

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN *SAVONIUS***

**“Studi Kasus Untuk Rasio Panjang Plat
Penggangu Relatif Terhadap Diameter Sudu
Turbin ($L/D = 1,0$)”**

I Gusti Irfan Adiyanto Ranuh
NRP 2112 100 152

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
OBSTACLE PLATE ANGLE IN FRONT OF
RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND
TURBINE PERFORMANCE**

**“Case study for the ratio of length of obstacle
plate relative to the diameter of turbine
(L/D)=1,0”**

**I Gusti Irfan Adiyanto Ranuh
NRP 2112 100 152**

**Adviser
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI
PENEMPATAN SUDUT PLAT DATAR PENGANGGU DI
DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk $(L/D)=1$; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; Bilangan *Reynolds* = 6×10^4 , 7.5×10^4 dan 9×10^4 ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

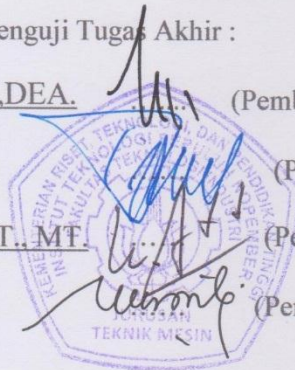
Oleh :

I GUSTI IRFAN ADIYANTO RANUH

NRP. 2112 100 152

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono,DEA. (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi M.Eng., PhD. (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 19710405199702100
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. (Penguji III)
NIP. 196202161995121001



SURABAYA

JANUARI, 2017

\

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk $(L/D) = 1$; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; Bilangan Reynolds
 $= 6,0 \times 10^4, 7,5 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$ ”

Nama Mahasiswa : I Gusti Irfan Adiyanto Ranuh
NRP : 2112 100 152
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Indonesia merupakan Negara yang kaya akan sumber daya alam, sumber daya yang saat ini banyak digunakan adalah sumber energi fosil, sumber daya ini seiring berjalannya waktu jumlah persediaannya akan habis. Oleh karena itu diperlukan pengembangan mengenai sumber daya alam diperbaharui, salah satu jenis sumber daya alam diperbaharui adalah sumber daya energi angin. Turbin angin tipe *Savonius* adalah salah satu tipe turbin angin yang memanfaatkan selisih gaya drag pada kedua sudu untuk memutar poros disambungkan ke generator listrik, semakin besar perbedaan gaya drag yang terjadi antara kedua sudu, semakin besar juga torsi yang di hasilkan, maka daya yang dihasilkan juga semakin besar. Dalam penelitian kali ini untuk meningkatkan pefoma turbin angin *Savonius*, akan dipasang penghalang berupa plat datar yang diletakkan di depan *returning blade* agar selisih gaya drag pada kedua sudu semakin besar.

Penelitian kali ini dilakukan pada *wind tunnel subsonic open circuit* penampang persegi delapan yang memiliki panjang 457 mm, tinggi 304 mm dan lebar 304 mm. Dengan menggunakan benda uji turbin angin *Savonius* dua sudu yang memiliki diameter sudu 60 mm, tinggi turbin 80 mm dan overlap 14 mm. untuk meningkatkan daya *output* yang dihasilkan, maka dalam penelitian kali ini turbin angin diberikan penghalang berupa plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dengan lebar 60 mm dan tinggi 150 mm. Dengan variasi bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 (dihitung

bedasarkan kecepatan free stream U dan panjang karakteristik $L = 2D$ -a) serta variasi sudut halang penempatan plat datar pengganggu yaitu $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ dengan interval 5° . Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran suhu wind tunnel menggunakan *thermometer*. Lalu menentukan frekuensi *wind tunnel* pada inverter agar mendapatkan kecepatan yang sesuai dengan bilangan *Reynolds* yang digunakan, pengukuran kecepatan ini menggunakan *pitot static tube*. Kemudian pengambilan data RPM turbin menggunakan *tachometer*, torsi statis dengan *torquemeter*, dan daya *output* turbin diukur menggunakan multimeter yang dihubungkan dengan motor listrik yang terhubung dengan poros turbin.

Hasil yang didapatkan pada penelitian kali ini menunjukkan bahwa dengan pemberian plat pengganggu dengan $L/D=1$ didepan *returning blade* turbin dapat meningkatkan peforma turbin angin *Savonius* yang ditandai dengan peningkatan nilai putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power (CoP)*. Jika dibandingkan dengan turbin tanpa diberikan pengganggu berupa plat datar, turbin angin *Savonius* akan mengalami peningkatan putaran maksimum pada sudut 35° dan Reynolds Number 6×10^4 dengan kenaikan mencapai 271%, untuk peningkatan torsi statis maksimum dari turbin angin *Savonius* terjadi pada penempatan sudut pengganggu 0° dan Reynold Number 9×10^4 dengan kenaikan mencapai 820%, dan untuk peningkatan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin *Savonius* didapat pada penempatan sudut pengganggu 35° dan bilangan *Reynolds* 6×10^4 dengan kenaikan mencapai 859%. Nilai *Coefficient of Power* maksimum didapatkan pada $TSR = 0,797$.

(Kata kunci : turbin Savonius, plat datar pengganggu, coefficient of power, bilangan Reynolds)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF DISTURBANCE PLACEMENT ANGLE VARIATION OF FLAT PLATE IN THE FRONT OF RETURNING BLADE OF SAVONIUS WIND TURBINE TO THE TURBINE PEFORMANCE

"Case Study for the Ratio of the Width of Flat Plate Relative to
the Diameter of Turbine ($L/D = 1$; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; and Reynolds
Number = 6.0×10^4 , 7.5×10^4 and 9.0×10^4 "

Name : I Gusti Irfan Adiyanto Ranuh
NRP : 2112 100 152
Major : Mechanical Engineering FTI - ITS
Adviser : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Indonesia is one of the country that has a lot of natural resources, currently the natural resource many used is a source of fossil energy. Along with time, natural resources availability is decreasing. To overcome the dependence towards fossils based energy, research is needed to get a new renewable energy. One of the alternative energy that has not been used optimally and has a high potential to be developed is wind energy. Savonius wind turbine is a type of wind turbines that utilize the difference of drag force between two blade to rotate the shaft to be connected to an electric generator and can work at low wind speeds in accordance with characteristics in Indonesia. By placing the disturbance flat plate in front of the returning blade of Savonius turbine, in order to decreased the drag force on the returning blade, and the Savonius wind turbine performance is expected to be increased. It is the objective of this research.

In order to increasing the performance of Savonius wind turbine having a diameter (D) of 60 mm and height (H) of 80 mm, a flat plate having a width (L) of 60 mm and Height (T) of 150 mm is used as a disturbance located in front of returning blade of turbine. This disturbance is located in various angle positions of $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. The experiments are carried out in a subsonic open circuit wind tunnel. This facility has a 457 mm long, with test

section 304 mm x 304 mm. The free stream velocity of wind tunnel could be adjusted to 8,77 m/s; 10,97 m/s; 13,16 m/s, corresponding respectively to Reynolds number (Re) = $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (based on equivalent length of $L = (2D-a)$, where b is the width of overlap of the two turbine blades, and the free stream velocity). The velocity of wind is measured using a pitot-static tube connected to the inclined manometer. The rotation of turbine is measured by Tachometer, the static torque is measured by Torque meter, and finally the power output of turbine is determined by measuring of voltage and electric current resulted by generator connecting to the shaft of Savonius turbine.

The experimental result show that the usage of the disturbance flat plate located in front of the returning blade, is effective to increase the wind turbine performance. This is shown by the rotation of turbine has maximal increase of 271% at $\alpha=35^\circ$ and $Re = 6,0 \times 10^4$; static torque has maximal increase to 820% $\alpha=0^\circ$ of $Re = 9,0 \times 10^4$; and Coefficient of Power has maximal increase of 859% at $\alpha=35^\circ$ and $Re = 6,0 \times 10^4$.

(Keyword: Savonius Wind Turbine, Disturbance Flat Plate, Coefficient of Power, Reynolds Number)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME, Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah-Nya hingga penulis dengan segala keterbatasannya dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS** ini dengan baik dan tepat pada waktunya. Dalam terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara moral maupun materi yakni :

1. Bapak **Ir .IGB Kurniawan Msc.** dan Ibu **Nora Puspita SE.** selaku orang tua Penulis serta **Hanif Rahmadi** dan **Firmansyah Kurniawan** selaku , adik-adik kandung dari penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tiada henti.
2. Bapak **Prof. Dr. IGN Gde Ranuh** dan Ibu **Rabiatul Abdijah** selaku kakek dan nenek dari penulis yang telah memberikan tempat tinggal yang luar biasa nyaman, dan dukungan yang tak terhingga kepada penulis selama proses masa perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
3. Bapak **Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA** sebagai dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan bimbingan dan ilmu mekanika fluida yang terkait tugas akhir.
4. Seluruh keluarga besar **RANUH** yang telah memberikan dukungan dan doa kepada penulis selama studi di kota pahlawan ini.
5. Seluruh kerabat **"Tugas Akhir Triyogi Yuwono (TA TRIYOGI'ERS)"** yang telah membantu dan menemani penulis dalam kondisi senang maupun duka selama proses pengerjaan tugas akhir.
6. Seluruh keluarga besar **"KOLAK"** yang selalu ada di dalam hati penulis, untuk memberikan semangat dan

mendoakan selalu agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

7. **Seluruh teman-teman angkatan M-55** yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terimakasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.
8. **Seluruh Dosen dan Karyawan** yang telah banyak membimbing penulis dalam menggali ilmu di S1 Teknik Mesin ITS.
9. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhirnya, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Surabaya, Februari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Masalah	5
1.4. Batasan Masalah.....	6
1.5. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Turbin Angin	9
2.2. Turbin Angin <i>Savonius</i>	10
2.3. Bilangan <i>Reynolds</i>	12
2.4. Koefisien Drag	14
2.5. Perhitungan Daya Turbin Berdasarkan Teori.....	16
2.6. <i>Coefficient of Power</i>	17
2.7. <i>Tip Speed Ratio</i>	18

2.8. Penelitian Terdahulu.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1. Parameter Pengukuran.....	29
3.2. Analisa Dimensi	31
3.2.1. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	31
3.3. Peralatan yang Digunakan	35
3.3.1. <i>Wind Tunnel</i> (Terowongan Angin)	35
3.3.2. Benda Uji	36
3.3.3. Alat Ukur	37
3.4. Prosedur Penelitian.....	42
3.5. <i>Flowchart</i> Penelitian	43
3.6. Urutan Langkah Penelitian	44
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	45
4.1. Contoh Perhitungan.....	45
4.1.1. Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	45
4.1.2. Perhitungan <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	49
4.1.3. Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	51
4.2. Analisa Performa Turbin Angin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Penganggu.....	51
4.2.1. Putaran Turbin Angin <i>Savonius</i> (n_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	51
4.2.2. Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	53
4.2.3. <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	54

4.3. Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ pada bilangan <i>Reynolds</i> 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4	55
4.3.1. Putaran Turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)	55
4.3.2. Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)...	63
4.3.3. <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)	67
4.3.4. <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	73
BAB V PENUTUP	77
5.1. Kesimpulan.....	77
5.2. Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	81
BIODATA PENULIS	89

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Skema Turbin <i>Savonius</i>	11
Gambar 2.2.	<i>Airflow</i> pada Turbin Angin <i>Savonius</i>	12
Gambar 2.3.	Aliran Melewati Sebuah Plat Datar yang Tegak Lurus Terhadap Arah Aliran	15
Gambar 2.4.	Faktor Daya Sebagai Fungsi TSR Berbagai Jenis Turbin	19
Gambar 2.5.	Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin <i>Savonius</i>	20
Gambar 2.6.	Grafik Pengaruh Panjang Pengganggu Terhadap <i>Coefficient of Power</i>	21
Gambar 2.7.	Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Besar Sudut Plat Plat (α dan β) Pada Pengganggu	21
Gambar 2.8.	Skema Alat Penelitian pada Turbin Angin Tipe <i>Savonius</i> dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu	22
Gambar 2.9.	Perbandingan Struktur Aliran pada Saat <i>Self Starting</i> dengan <i>Speed Ratio</i> (λ) = 0,7; a: Turbin Dua Sudu ; b: Turbin Tiga Sudu	23
Gambar 2.10.	Grafik Hubungan Antara <i>Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient</i> (C_p) pada Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Dua Sudu	24
Gambar 2.11.	Grafik Hubungan Antara <i>Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient</i> (C_p) pada Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Tiga Sudu	25
Gambar 2.12.	Skema Turbin <i>Savonius</i> dengan Sudu Setengah Lingkaran dan Sudu Bentuk Optimal	26
Gambar 2.13.	Grafik Perbandingan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya Turbin <i>Savonius</i> dengan Pemberian Plat Pengganggu Menggunakan Sudu Klasik dan Sudu Bentuk Optimal Terhadap (a) <i>Torque Coefficient</i> dan (b) <i>Power Coefficient</i>	27

Gambar 3.1.	Skema Penelitian	30
Gambar 3.2.	Skema <i>Wind Tunnel Sub Sonic</i>	35
Gambar 3.3.	Skema Benda Uji (a) Turbin Angin <i>Savonius</i> , (b) Plat datar sebagai Pengganggu	36
Gambar 3.4.	Foto Benda Uji (a) Turbin Angin <i>Savonius</i> , (b) Plat datar sebagai Pengganggu	37
Gambar 3.5.	Tachometer OMEGA seri HHT12	38
Gambar 3.6.	Torquemeter LUTRON model : TQ-8800	38
Gambar 3.7.	Thermometer	39
Gambar 3.8.	<i>Pitot Static Tube</i>	39
Gambar 3.9.	Manometer	40
Gambar 3.10.	Sanwa Multimeter Digital CD-771	40
Gambar 3.11.	Rangkaian Generator dan Beban Lampu	41
Gambar 3.12.	Flowchart Penelitian	43
Gambar 4.1.	Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	52
Gambar 4.2.	Grafik Torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re).....	53
Gambar 4.3.	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	55
Gambar 4.4.	Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai fungsi sudut halang (α)	56
Gambar 4.5.	Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut halang (α)	58
Gambar 4.6.	Posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90°	60
Gambar 4.7.	Kontur kecepatan hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	61
Gambar 4.8.	Kontur <i>pressure</i> hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	62
Gambar 4.9.	Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut halang (α)	64
Gambar 4.10.	Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (α)	66

Gambar 4.11. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i>) sebagai fungsi sudut halang (α)	68
Gambar 4.12. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i>) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (<i>Re</i>) pada $\alpha = 35^\circ$	71
Gambar 4.13. Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i> / <i>CoP_o</i>) sebagai fungsi sudut halang (α)	72
Gambar 4.14. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i>) sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (<i>TSR</i>) ...	74
Gambar 4.15. Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i>) sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (<i>TSR</i>) pada $\alpha = 35^\circ$	76

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	<i>Drag coefficient</i> untuk Berbagai Bentuk Benda pada $Re \geq 1000$	15
Tabel 3.1.	Parameter dan Dimensinya	32
Tabel 3.2.	<i>Table Planner</i> Penelitian	44

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

D	diameter turbin Savonius (m)
H	tinggi turbin Savonius (m)
A	luas sapuan pada turbin Savonius yang ditabrak oleh angin (m^2)
d	diameter sudu turbin <i>Savonius</i> (m)
L	lebar plat datar pengganggu (m)
T	tinggi plat pengganggu (m)
a	lebar <i>overlap</i> (m)
b	tebal plat penghalang (m)
S	proyeksi lebar plat datar terhadap sudut pada penghalang (m)
α	Sudut penempatan plat datar pengganggu
D	panjang karakteristik turbin Savonius (m)
R	jari-jari turbin Savonius (m)
C_D	koefisien <i>drag</i>
F_D	gaya <i>drag</i> (N)
V	tegangan listrik (volt)
I	arus listrik (ampere)
P	daya (Watt)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
CoP_0	<i>Coefficient of Power</i> standar
n	putaran poros turbin (rpm)
n_0	putaran poros turbin standar (rpm)
T	torsi statis turbin (Ncm)
T_0	torsi statis turbin standar (Ncm)
Re	bilangan Reynolds
ρ	Densitas fluida (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (Ns/m^2)
Re	bilangan Reynolds
\dot{m}	laju aliran massa (kg/s)
U_∞	kecepatan <i>freestream</i> (m/s)
TSR	<i>tip speed ratio</i>
ω	kecepatan angular turbin Savonius (rad/s)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara yang kaya akan sumber daya alam, terutama sumber daya alam yang dapat menghasilkan energi untuk keberlangsungan kehidupan. Sumber daya alam yang saat ini sering digunakan adalah energi fosil, diantaranya batu bara, minyak tanah, dan gas alam. Sumber energi fosil adalah jenis sumber daya alam tidak dapat diperbaharui, sehingga seiring berjalannya waktu sumber energi tersebut akan habis digunakan. Oleh karena itu diperlukannya pengembangan mengenai sumber energi yang dapat diperbarui (*renewable energy*). Disamping ketersediaannya sudah menipis, sumber energi fosil juga berdampak negatif dengan lingkungan, maka dari itu di butuhkan pengembangan sumber energi yang dapat diperbarui dan ramah dengan lingkungan. Salah satu sumber energi yang belum di manfaatkan secara optimal dan memiliki potensi besar untuk di kembangkan dan ramah lingkungan adalah sumber energi angin.

Energi angin dapat digunakan untuk memutar poros turbin angin (*wind turbin*) yang kemudian putaran tersebut ditransmisikan ke generator listrik. Prinsip kerja dari turbin angin adalah untuk membangkitkan energi listrik dengan mengubah energi mekanik dari angin menjadi energi putar pada turbin dan digunakan untuk memutar generator yang akan menghasilkan energi listrik. *wind turbin* sudah sangat berkembang dari sisi efisiensi, daya puncaknya dan reliablility. Lebih dari sepuluh tahun kapasitas angin global secara terus menerus meningkat. Amerika Serikat dan Jerman menjadi salah satu pasar utama dari pembangkit tenaga angin, industri pembangkit listrik tenaga angin menyerap tenaga kerja cukup banyak. Penyimpanan dan pendistribusian daya listrik masih menjadi masalah utama, khususnya ketika kuantitas daya yang dihasilkan sangat bervariasi dengan waktu dan lokasi.

Savonius turbin adalah salah satu jenis dari pembangkit listrik bertenaga angin dengan vertical axis yang ditemukan pada tahun 1922 oleh *engineer* asal finlandia Sigurd Johannes Savonius, konsep dasar savonius turbin konvensional adalah pemotongan plat silinder menjadi dua bagian sepanjang bidang pusat dan disatukan seperti huruf S, sehingga savonius turbin konvensional hanya terdiri dari dua sudu. Savonius turbin adalah jenis turbin angin tipe *drag*. Yaitu turbin yang memanfaatkan gaya drag yang terjadi di setiap sudunya. Sudu savonius dibagi menjadi dua yaitu *advancing blade* dan *returning blade*, selisih gaya drag pada kedua sudu tersebut akan menghasilkan torsi, yang apabila di hitung dengan kecepatan angular turbin akan menghasilkan daya turbin angin tersebut. Semakin besar selisih gaya drag pada kedua sudu, semakin besar juga daya yang dihasilkan oleh turbin angin tersebut. Ada beberapa cara meningkatkan selisih gaya drag antar sudu, salah satunya adalah mengurangi gaya drag pada *returning blade*, Gaya drag dapat direduksi dengan mengontrol boundary layer yang timbul dengan cara menempatkan pengganggu di depan returning blade turbin angin.

Ada beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait dengan reduksi gaya drag dan pemberian pengganggu pada turbin angin tipe Savonius. Pada penelitian **Altan et al (2008)** melakukan penelitian pada turbin angin Savonius diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin dengan variasi panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) dan besar sudut plat (α dan β) dengan kecepatan angin 7 m/s dan bilangan Reynolds $1,5 \times 10^5$. Hasil penelitian didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (C_p) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu ℓ_1 sebesar 45cm dan ℓ_2 sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

Mohamed et al (2010) disimulasikan turbin savonius dengan software CFD dengan diberinya pengganggu berupa plat datar pada *returning blade* dengan variasi besar sudut plat (β) dan

speed ratio (λ) dengan kecepatan angin 10 m/s. Simulasi yang dilakukan adalah membandingkan antara turbin savonius dengan dua sudu dan turbin dengan tiga sudu yang masing masing diberi penghalang. Hasil simulasi didapatkan bahwa dengan penambahan plat pengganggu dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* pada turbin Savonius dua sudu maupun tiga sudu. dan Coefficient of Power (C_p) dari turbin angin Savonius juga dapat meningkat hingga 27,3% pada speed ratio 0,7 dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$ dengan menggunakan dua buah sudu berpengganggu. Sedangkan apabila menggunakan tiga buah sudu berpengganggu, hasil dari Coefficient of Power (C_p) turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,5% pada speed ratio 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$.

Pada penelitian yang lain dari **Mohamed et al (2010)** adalah peningkatan peforma turbin angin tipe savonius dua sudu, menggunakan *software* CFD dengan diberi penghalang di depan sisi *returning blade* berupa plat datar dengan besar sudut plat (β) dan speed ratio (λ). Pada penelitian ini plat penghalang diletakkan pada posisi ($X_1/R = -1.2383$, $Y_1/R = -0.4539$, $X_2/R = -1.0999$ dan $Y_2/R = -1.1770$, dengan sudut $\beta = 100.8^\circ$). Penelitian ini membandingkan antara turbin *Savonius* konvensional dengan turbin *Savonius* dengan sudu optimal yang beri penghalang didepan sisi *returning blade*. Dari hasil simulasi di dapatkan *power output coefficient* (C_p) dari turbin savonius dengan sudu yang telah dimodifikasi dan diberi penghalang dapat meningkat hingga 38,9% pada *speed ratio* (λ) = 0,7. dan kenaikan relative tertinggi pada (λ) = 1,4 dengan nilai 75,4%

Banyak variasi eksperimen yang dapat dilakukan untuk meningkatkan peforma turbin angin Savonius. Sehingga pada studi eksperimen kali ini akan dilakukan peningkatan peforma turbin angin Savonius dengan cara menambahkan penghalang berupa plat datar berbentuk persegi panjang yang diletakkan di depan sisi *returning blade* tegak lurus dengan arah angin. Plat datar tersebut di pasang dengan variasi sudut kemiringan 0° sampai 90° dengan interval 5° dengan bilangan *Reynolds* sebesar 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4

1.2 Rumusan Masalah

Sudu savonius turbin terbagi menjadi dua yaitu *advancing blade* dan *returning blade*, perbedaan dari kedua *blade* ini terletak pada bagian cekungan dalam sudu turbin. *advancing blade* mempunyai sudu yang melengkung kedalam searah dengan arah angin, dan *returning blade* adalah sudu yang melembung searah dengan arah aliran.

Savonius turbin akan berputar ketika terjadi gaya drag yang lebih besar pada *advancing blade* daripada *returning blade*, adanya perbedaan gaya drag pada kedua sisi sudu ini membuat torsi yang akan dihasilkan juga berbeda, hasil dari perbedaan torsi ini dikali dengan kecepatan angular turbin akan menghasilkan daya turbin.

Semakin besar perbedaan gaya drag pada kedua sudu, semakin besar juga perbedaan torsi yang dihasilkan, dan daya yang dibangkitkan juga semakin besar. Jika pada *returning blade* diberikan penghalang berupa plat, maka diharapkan akan memperkecil gaya drag dan torsi negatif yang mengarah pada *returning blade*, dan pada saat kemiringan tertentu diharapkan adanya aliran yang membentur plat penghalang dan diarahkan kearah *advancing blade*, sehingga dapat memperbesar gaya drag pada *advancing blade*. Karena hal tersebut perbedaan gaya drag dan torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* akan semakin besar, dan daya yang dihasilkan juga semakin besar.

Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa plat datar pada *returning blade*, yang di variasikan sudut kemiringannya dengan sumbu horizontal yang tegak lurus dengan arah aliran angin, Hipotesis awal dari penelitian ini.

1. Turbin angin yang disusun secara vertikal dan plat datar diletakkan di depan *returning blade* sebagai pengganggu efektif dalam mengganggu aliran yang mengarah pada *returning blade*. Akibat pengganggu ini diperkirakan akan memeperkecil

gaya drag yang diterima pada *returning blade*, hal ini akan memperbesar perbedaan gaya drag yang diterima oleh kedua sudu sehingga perbedaan torsi positif dan negatif juga semakin besar, hal tersebut akan membangkitkan daya lebih besar.

2. Variasi sudut kemiringan penghalang plat datar yang di letakkan di depan sisi *returning blade* turbin angin, akan mengarahkan arah aliran angin pada sisi *advancing blade*. Sehingga aliran fluida yang menuju sisi *advancing blade* akan lebih banyak dari sebelum diberikannya penghalang. Hal tersebut akan berpengaruh pada peningkatan gaya drag yang di terima *advancing blade*. Hal tersebut juga akan meningkatkan torsi positif yang dihasilkan oleh *advancing blade*.

Untuk membuktikan hipotesis diatas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin tipe Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 60 mm dan tinggi (H) = 80 mm serta sebuah pengganggu berupa plat datar dengan lebar (L) = 60 mm dan tinggi (T) 150 mm. sudut kemiringan plat di variasikan dengan sudut 0° , 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90° dengan bilangan *Reynolds* sebesar 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

1.3 Tujuan Masalah

Tujuan dari eksperimen ini adalah peningkatan peforma dari wind turbin tipe savonius, dengan cara menambahkan penghalang berupa plat datar yang diletakkan pada sisi *returning blade* savonius turbin, dan mempelajari secara detail pengaruh dari perubahan sudut pada plat datar pengganggu terhadap turbin angin dengan mengukur :

1. Putaran dari turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

2. Torsi statis dari turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
3. Nilai tegangan dan hambatan dari generator listrik untuk mendapatkan nilai daya yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Perlunya batasan masalah untuk penelitian kali ini, agar penelitian yang dilakukan tetap pada tujuan yang diinginkan. Adapun batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada sisi *upstream*, dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
2. Analisa dilakukan pada turbin angin tipe *Savonius* dengan diameter (D) = 60 mm dan pengganggu berupa plat datar dengan lebar (l) = 60 mm. dan tinggi (T) = 150 mm
3. Variasi sudut kemiringan plat penghalang pada *returning blade* turbin angin yang digunakan sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90°
4. Analisa aliran yang dilakukan yaitu aliran dua dimensi.
5. Analisa aliran yang dilakukan yaitu *external flow*.
6. Kemungkinan terjadinya perpindahan panas dapat diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan referensi rancangan turbin angin savonius yang sesuai dengan profil kecepatan angin di Indonesia.
2. Memberikan kontribusi pada pengembangan energi terbarukan khususnya energi angin di Indonesia.
3. Mengetahui hasil konfigurasi yang tepat dengan variasi yang dilakukan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin Angin adalah sebuah perangkat yang mempunyai kemampuan untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian dapat diubah menjadi energi listrik dengan cara menyambungkan poros tersebut dengan generator. Desain turbin angin secara umum di bagi menjadi dua yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* dan *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

Horizontal wind turbine atau (*HAWT*) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Secara umum jenis turbin ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Turbin ini berputar dikarenakan adanya gaya *lift* (gaya angkat) pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Turbin ini cocok digunakan pada tipe angin kecepatan sedang dan tinggi, dan banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar. Jumlah *blade* pada *HAWT* bervariasi tergantung pada kebutuhan dan kondisi angin, mulai dari satu *blade*, dua *blade*, tiga *blade* dan banyak *blade*. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran yang dihasilkan turbin. Setiap desain turbin memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini yaitu memiliki efisiensi yang tinggi dan semakin tinggi menara turbin, maka semakin besar kecepatan angin. Kekurangannya, yaitu semakin tinggi menara dan semakin panjang sudu, maka semakin besar biaya instalasi dan

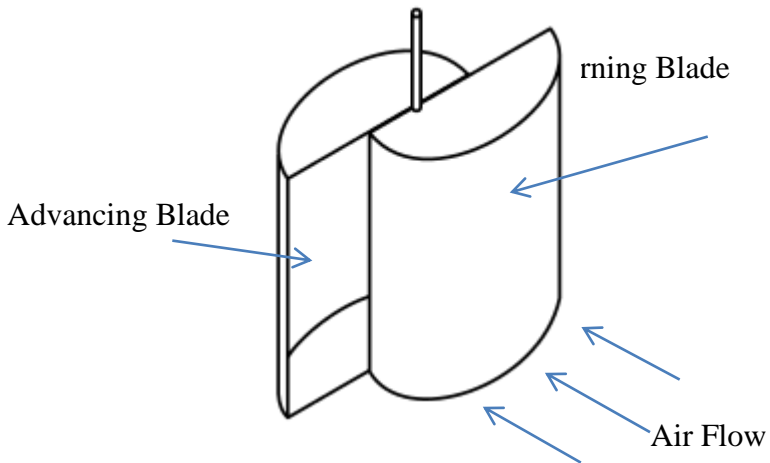
perawatannya. Selain itu, konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga *gearbox*, sudu dan generator.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbin yang memiliki sumbu putar yang tegak lurus dengan permukaan tanah dan memiliki kemampuan untuk menerima angin dari berbagai arah yang akan menggerakkan generator di permukaan tanah. Ada tiga tipe sudu pada turbin angin jenis ini, yaitu tipe Savonius, Darrieus dan Giromill. Turbin Savonius memanfaatkan gaya *drag* sedangkan Darrieus dan Giromills memanfaatkan gaya *lift*. VAWT juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, tidak membutuhkan struktur menara yang besar, dan generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah *perawatan*. Kekurangannya yaitu, kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai menara akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi yang di hasilkan lebih rendah dibandingkan dengan *HAWT*.

2.2 Turbin Angin Savonius

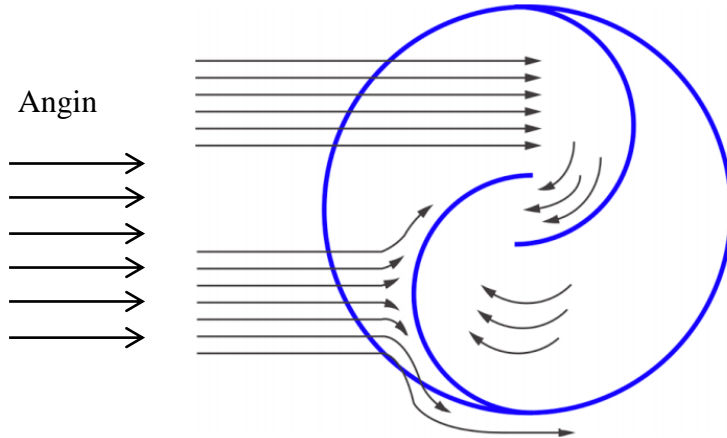
Turbin angin savonius pertama kali diperkenalkan pada tahun 1922 oleh seorang Insinyur dari Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius. Turbin ini merupakan trubin berjenis VAWT Vertical Axis Wind Turbine sehingga memanfaatkan gaya drag untuk memutar porosnya. turbin angin ini memiliki paling sedikit dua sudu, sudu tersebut dibedakan menjadi dua jenis yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan antara kedua jenis sudu tersebut terletak pada cekungan bagian dalam sudu turbin. *advancing blade* memiliki cekungan bagian dalam sudu turbin yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran, sedangkan untuk *returning blade* bentuknya berlawanan

dengan *advancing blade* yaitu cekungannya membelakangi arah angin.



Gambar 2.1 Skema Turbin Savonius (Sumber : <https://magnafandy.wordpress.com/2008/06/03/savonius-turbin/>)

Dikarenakan koefisien hambat dari sisi *advancing blade* lebih besar dari pada sisi *returning blade*. Maka dari itu gaya drag yang diterima pada sisi advancing blade lebih besar di bandingkan dengan gaya drag yang di terima pada sisi returning blade. Dengan adanya perbedaan gaya drag dari kedua sudu, maka akan timbul torsi sehingga membuat turbin angin ini berputar.



Gambar 2.2 Airflow pada Turbin Angin Savonius (Sumber : <http://diyegreen.blogspot.co.id/2014/12/detail-gorlov-helical-wind-turbine.html>)

2.3 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viscous yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen.

Bilangan *Reynolds* merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain, untuk memberikan kriteria untuk menentukan *dynamic similitude*. Jika dua pola aliran yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju aliran yang berbeda pula, memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \quad (2.1)$$

dimana :

$$\text{Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \quad (2.3)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right)} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

dengan penjelasan:

- ρ : densitas fluida
- U_{∞} : kecepatan free stream flow di fluida
- μ : viskositas dinamis fluida
- L : panjang karakteristik

Dalam studi eksperimen ini panjang karakteristik yang dimaksud adalah diameter turbin (d) dengan persamaan $d=2D-a$

dimana :

D = diameter sudu turbin

a = lebar *overlap* antara kedua sudu turbin.

Maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot D}{\mu} = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot (2D - a)}{\mu} \quad (2.5)$$

2.4 Koefisien Drag

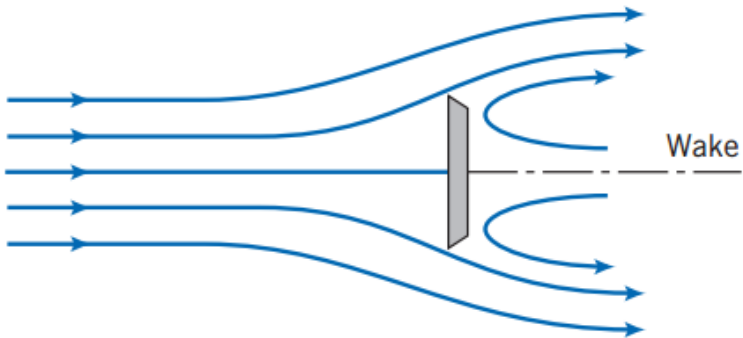
Setiap benda yang bergerak melalui sebuah fluida, akan mengalami interaksi berupa tekanan dan tegangan geser. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag* (gaya hambat), sedangkan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* (gaya angkat). Gaya hambat (*drag*) seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag* (C_D) yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui gaya hambat dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 A} \quad (2.6)$$

dimana :

F_D	: Gaya <i>Drag</i>
$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2$: Tekanan dinamis aliran bebas
A	: Luas permukaan benda

Sebagian besar informasi yang tersedia mengenai *drag* (gaya hambat) pada sebuah benda adalah hasil dari eksperimen yang banyak dilakukan dengan *wind tunnel*, *water tunnel*, *towing tank*, dan peralatan lainnya. Hasil dari eksperimen-eksperimen ditunjukkan di beberapa gambar sebagai berikut.



Gambar 2.3 Aliran Melewati Sebuah Plat Datar yang Tegak Lurus Terhadap Arah Aliran (Audiyatra, 2016)

Tabel 2.1 *Drag coefficient* untuk Berbagai Bentuk Benda pada $Re \geq 1000$ (Fox, 1998)

Object	Diagram	$C_D(Re \approx 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

2.5 Perhitungan Daya Turbin Berdasarkan Teori

Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan. Udara akan mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara dipengaruhi oleh sinar matahari. Daerah yang banyak terkena paparan sinar matahari akan memiliki temperatur yang lebih tinggi dibanding daerah yang sedikit terkena paparan sinar matahari. Menurut hukum gas ideal, temperatur berbanding terbalik dengan tekanan, dimana temperatur yang tinggi akan memiliki tekanan yang rendah, dan sebaliknya. Udara yang memiliki massa (m) dan kecepatan (v) akan menghasilkan energi kinetik sebesar:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (2.7)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu :

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \quad (2.8)$$

Sehingga energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U \times U^2$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.9)$$

Dimana:

- E_k = energi kinetik (Joule)
- P_w = daya angin (watt)
- ρ = massa jenis udara (kg/m^3)
- A = luas penampang turbin (m^2)
- U = kecepatan udara (m/s)

Besar daya di atas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Dari daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin.

2.6 *Coefficient of Power*

Koefisien daya atau disebut juga *Coefficient of Power* adalah perhitungan untuk menentukan besarnya performa turbin angin. *Coefficient of Power* ditunjukkan dengan perbandingan antara daya rill yang dihasilkan turbin karena terkena angin, dengan daya kinetic dari angin itu sendiri. Semakin besar nilai *Coefficient of Power* nya, maka performa turbin angin tersebut akan semakin baik.

Daya kinetic yang dihasilkan oleh angin (P_w) didapat dari persamamaan 2.9, dan perhitungan daya rill yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung juga menggunakan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator (P_G) yang di putar oleh turbin. Hubungan antara tegangan (V) dan Arus (I) dapat di tuliskan pada persamaan di bawah :

$$P_G = V \cdot I \quad (2.10)$$

Sehingga pada studi eksperimen kali ini *Coefficient of Power* (C_{op}) yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$C_{op} = \frac{P_G}{P_w} \quad (2.11)$$

$$C_{op} = \frac{V \cdot I}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.12)$$

2.7 *Tip Speed Ratio*

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan dengan λ .

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w}$$

Dengan:

$$\begin{aligned}\lambda &= \text{tip speed ratio} \\ \omega &= \text{kecepatan sudut turbin (rad/s)} \\ R &= \text{jari-jari turbin (m)} \\ U_w &= \text{kecepatan angin (m/s)}\end{aligned}$$

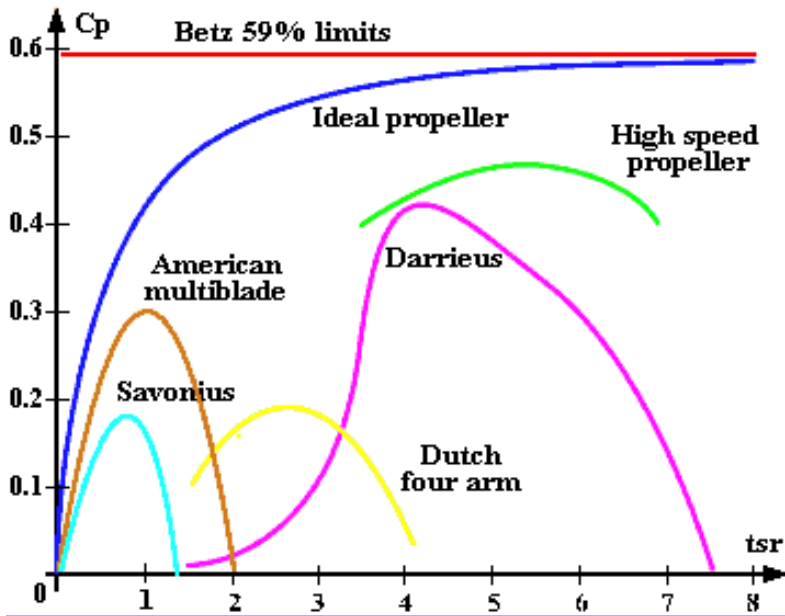
Selain menggunakan persamaan (2.13), TSR juga dapat diperoleh dari persamaan:

$$\lambda = \frac{\text{blade tip speed}}{U_w} \quad (2.14)$$

Blade tip speed merupakan kecepatan ujung *blade* atau rotor, dimana :

$$\text{Blade tip speed} = \frac{\text{rotational speed (rpm)} \times \pi \times D}{60}$$

Karena setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari TSR juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.4 berikut:



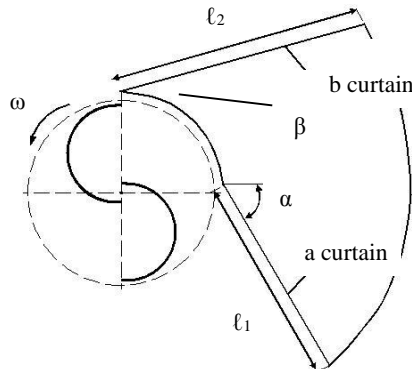
Gambar 2.4 Faktor Daya Sebagai Fungsi TSR Berbagai Jenis Turbin (Khan, 2009)

2.8 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan studi eksperimen ini, adapun beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dan menunjang penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut yang akan dijabarkan antara lain

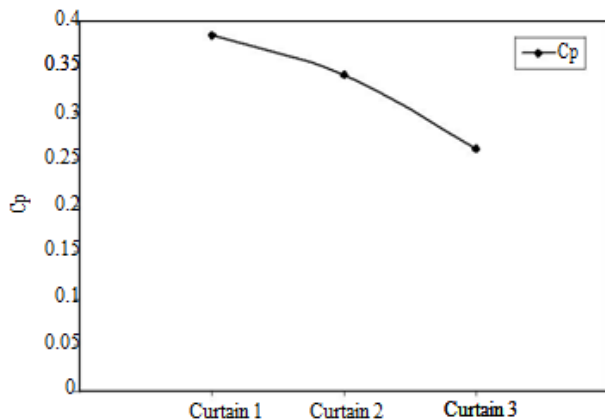
Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin, dilakukan oleh **Altan et al (2008)** dengan memvariasikan panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) dan besar sudut plat (α dan β) dengan kecepatan angin 7 m/s serta bilangan Reynolds $1,5 \times 10^5$. Hasil

penelitian tersebut didapat kan bahwa kenaikan harga *Coefficient of Power* (C_p) disebabkan oleh peningkatan panjang plat pengganggu (ℓ_1 dan ℓ_2) dan dipengaruhi oleh besar sudut plat (α dan β).

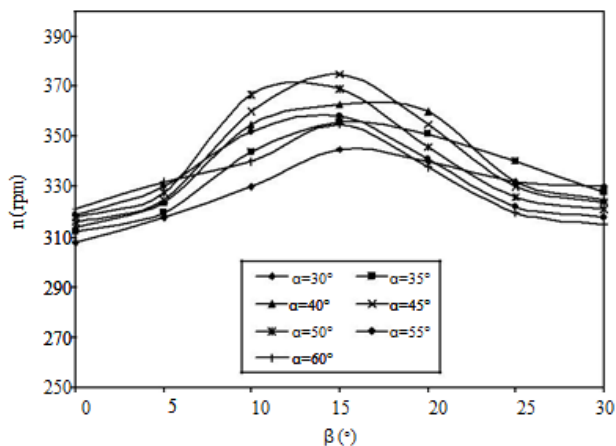


Gambar 2.5 Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008)

Hasil penelitian didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (C_p) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu ℓ_1 sebesar 45cm dan ℓ_2 sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Hal ini dikarenakan adanya plat pengganggu tersebut menyebabkan penyempitan daerah masuknya angin, sehingga meningkatkan kecepatan angin yang masuk ke dalam rotor dan meningkatkan kinerja rotor. Semakin panjang plat pengganggu maka dapat mengarahkan dan mengumpulkan angin lebih banyak untuk memutar rotor.

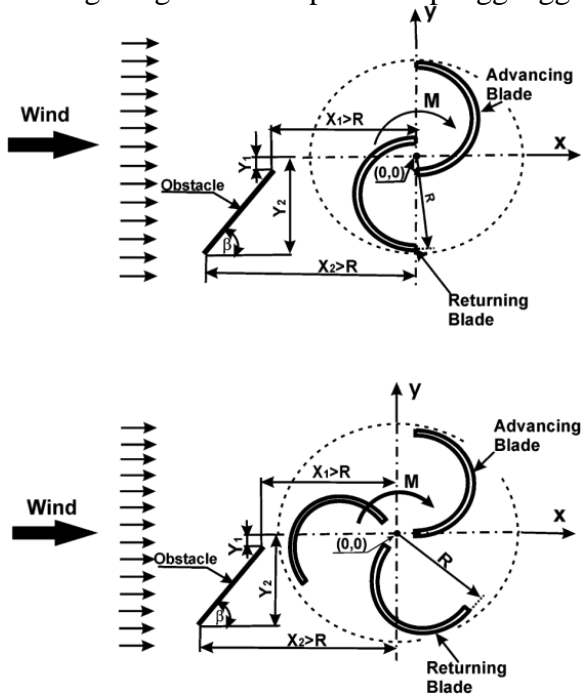


Gambar 2.6 Grafik Pengaruh Panjang Pengganggu Terhadap *Coefficient of Power* (Altan et al, 2008)



Gambar 2.7 Grafik Pengaruh Putaran Turbin Terhadap Besar Sudut Plat (α dan β) pada Pengganggu 1 (Altan et al, 2008)

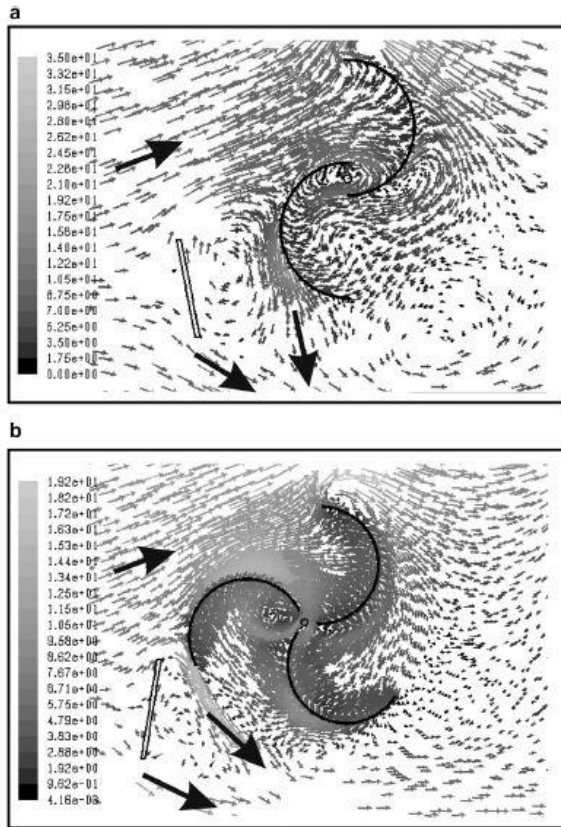
Penelitian dari **Mohamed et al (2010)** mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe Savonius menggunakan software CFD dan diberi penghalang di depan returning blade berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta speed ratio (λ) dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/ Simulasi ini membandingkan antara turbin Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu serta masing-masing dengan atau tanpa diberi pengganggu.



Gambar 2.8 Skema Alat Penelitian pada Turbin Angin Tipe Savonius dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu (**Mohamed et al, 2010**)

Hasil dari simulasi didapatkan bahwa jumlah sudu berpengaruh terhadap kemampuan *self starting* yang dimiliki oleh turbin Savonius. Aliran fluida pada turbin

Savonius berdasarkan simulasi pada saat melakukan *self starting* dapat dilihat pada gambar 2.9.

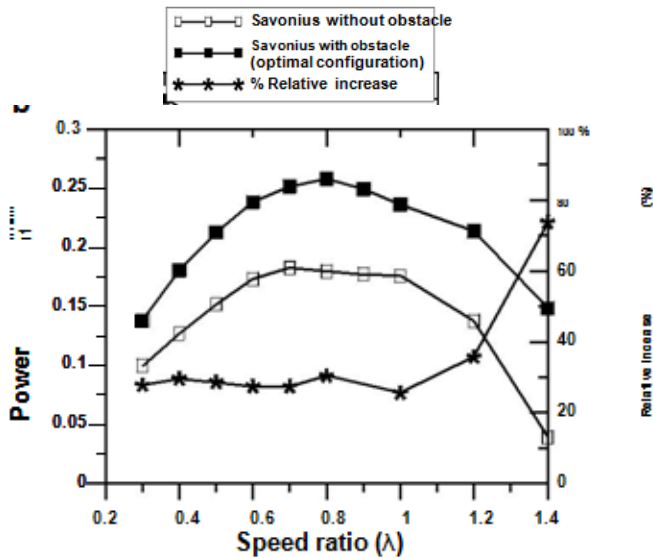


Gambar 2.9 Perbandingan Struktur Aliran pada Saat *Self Starting* dengan *Speed Ratio* (λ) = 0,7; a: Turbin Dua Sudu ; b: Turbin Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)

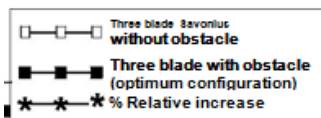
Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa turbin dengan tiga sudu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik daripada turbin dua sudu. Selain pada kemampuan *self starting*, penambahan plat pengganggu juga

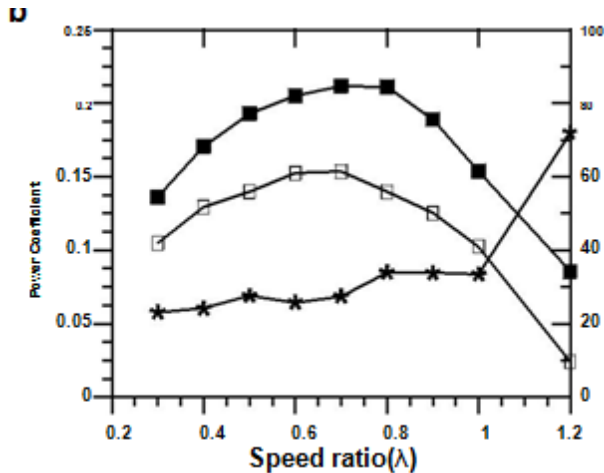
berpengaruh terhadap nilai koefisien torsi dan koefisien daya dari kedua turbin tersebut. Grafik nilai koefisien torsi dan daya dapat dilihat pada gambar 2.10 dan 2.11.

Hasil simulasi didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (C_p) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,3% pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$ dengan menggunakan dua buah sudu berpengganggu. Sedangkan apabila menggunakan tiga buah sudu berpengganggu, hasil dari *Coefficient of Power* (C_p) turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,5% pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$.



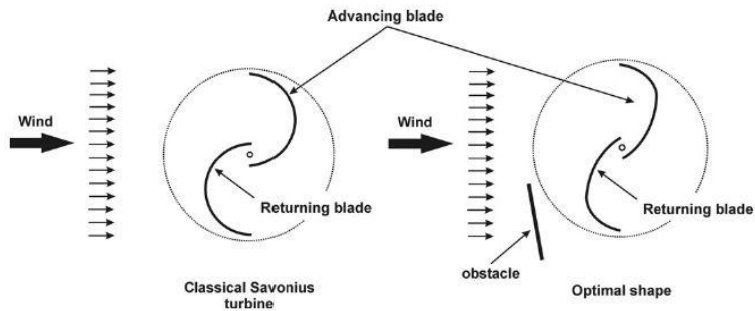
Gambar 2.10 Grafik Hubungan Antara *Speed Ratio* dan *Power Coefficient* (C_p) pada Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu (Mohamed et al, 2010)





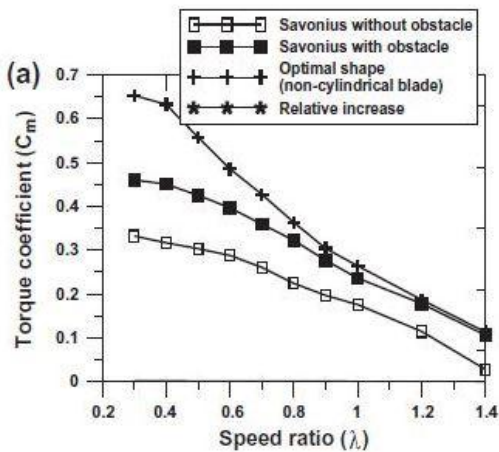
Gambar 2.11 Grafik Hubungan Antara *Speed Ratio* dan *Power Coefficient* (C_p) pada Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)

Penelitian selanjutnya oleh **Mohamed et al, 2010** adalah menganalisa pengaruh pemberian penghalang dan pengaruh bentuk turbin terhadap performa turbin Savonius dengan menggunakan software CFD. Turbin Savonius yang digunakan pada penelitian ini menggunakan dua bentuk sudu yaitu sudu setengah lingkaran dan sudu bentuk optimal. Gambar skema turbin Savonius dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.12.

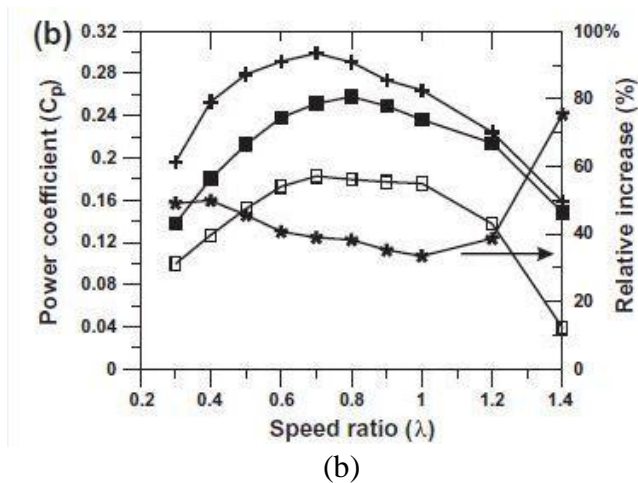


Gambar 2.12 Skema Turbin Savonius dengan Sudu Setengah Lingkaran dan Sudu Bentuk Optimal (Mohamed et al, 2010)

Pada penelitian kali ini akan diukur nilai koefisien torsi, koefisien daya dan koefisien torsi statis berdasarkan *speed ratio*, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada gambar 2.13 (a) & (b)



(a)



Gambar 2.13 Grafik Perbandingan Koefisien Torsi dan Koefisien Daya Turbin Savonius dengan Pemberian Plat Pengganggu Menggunakan Sudu Klasik dan Sudu Bentuk Optimal Terhadap (a) *Torque Coefficient* dan (b) *Power Coefficient* (Mohamed et al, 2010)

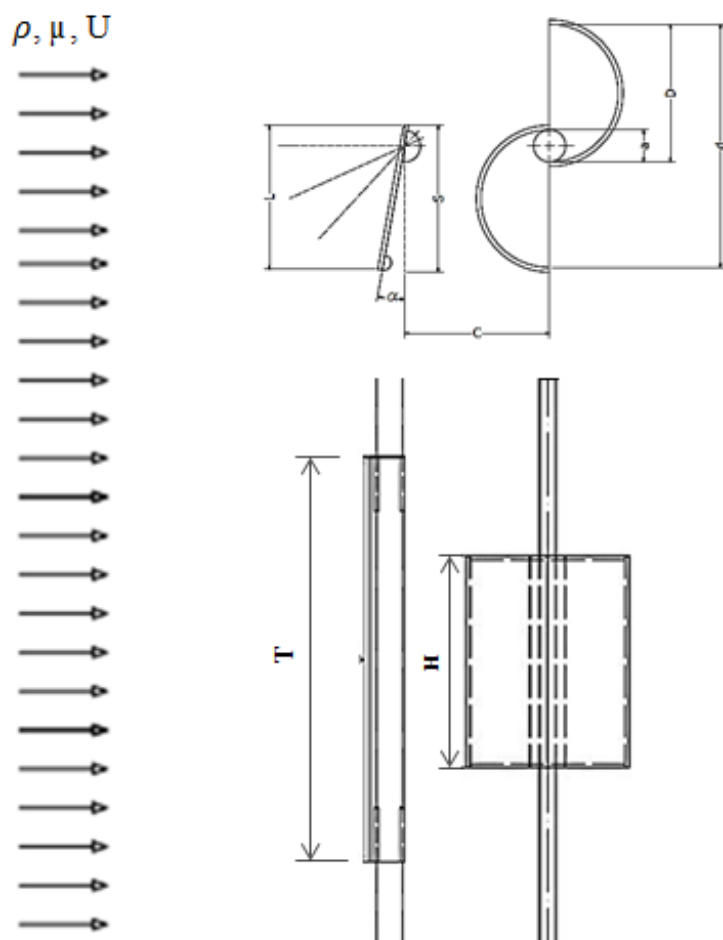
Hasil yang didapat pada penelitian ini menunjukkan bahwa turbin Savonius dengan menggunakan sudu bentuk optimal dan pemberian plat pengganggu memiliki nilai koefisien torsi, koefisien daya dan koefisien torsi statis yang lebih besar daripada turbin yang tanpa menggunakan pengganggu maupun turbin yang menggunakan sudu setengah lingkaran. Pada gambar 2.13a menunjukkan bahwa kenaikan torsi tertinggi terjadi pada nilai λ yang rendah, dan pada gambar 2.13b menunjukkan turbin Savonius yang telah diberi penghalang dengan sudu optimal terjadi kenaikan daya output sebesar 38,9% pada $\lambda = 0,7$ dengan kenaikan relatif tertinggi 75,4% pada $\lambda = 1,4$.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Parameter Pengukuran

Pada penelitian kali ini, diperlihatkan skema alat penelitian dan parameter yang akan digunakan dalam pengukuran peningkatan performa dari turbin angin *Savonius*. Parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida pada penelitian ini adalah densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan fluida (U), diameter sudu turbin Savonius (D), lebar plat pengganggu (L/D), tinggi turbin savonius (H), diameter overlap (b) dan sudut plat datar pengganggu (α). Pengukuran kali ini akan didapat data berupa *Coefficient of Power (CoP)* sebagai fungsi dari bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu (α) yang nantinya akan dibandingkan antara *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* sebelum diberikan pengganggu dengan turbin angin *Savonius* setelah diberikan pengganggu, berikut skema penelitian dan parameter yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Skema Penelitian

Dimana:

1. ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
2. U = kecepatan fluida (m/s)
3. μ = viskositas fluida (Ns/m^2)
4. d = diameter turbin (m)
5. D = diameter sudu turbin (m)
6. a = Diameter overlap (m)
7. C = Jarak antara poros turbin dengan poros penghalang (m)
8. α = sudut penempatan plat pengganggu
9. L = lebar plat pengganggu (m)
10. S = proyeksi lebar plat terhadap sudut penghalang
11. H = Tinggi turbin Savonius (m)
12. T = Tinggi plat datar penghalang (m)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui parameter pengujian yang berpengaruh pada karakteristik aliran fluida yang disebabkan oleh pemberian benda pengganggu berupa plat datar. Dan analisa dimesi juga diperlukan untuk mengurangi jumlah kerumitan variable experimental dengan teknik peringkasan.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power* (CoP)

Langkah untuk menganalisa dimensinya yaitu:

1. Menentukan variable yang mempunyai *power*

$$P=f(\rho,\mu,U,D,L,S,H, a)$$

Jumlah dari parameter (n) = 9 buah.

Parameter tersebut yaitu:

P = Power (J/s)

ρ = densitas udara (kg/m^3)

μ = viskositas absolut udara (Ns/m^2)

U = Kecepatan aliran udara (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

L = Lebar pengganggu berupa plat datar (m)

S = Proyeksi lebar plat terhadap sudut penghalang ($S = L \cdot \cos \alpha$) (m)

H = Tinggi turbin Savonius (m)

a = Diameter overlap (m)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisa.
 - Dipilih M , L , t .
3. Membuat dimensi primer dari parameter yang dipilih seperti pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter dan Dimensinya

Parameter	P	ρ	μ	U	D	L	S	H	a
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L

4. Memilih variabel berulang yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan, yaitu: ρ , U , dan D .

Jumlah dari variabel yang berulang (m) = $r = 3$.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah variabel tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
 - $n - m = 9 - 3 = 6$ grup variabel yang tak berdimensi.
 Maka:

$$i. \quad \pi_1 = \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana:

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$T : -b - 3 = 0$$

diperoleh:

$$a = -1; b = -3; c = -2$$

sehingga,

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

ii. Dengan cara yang sama, diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{L}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{a}{D}$$

6. Mengevaluasi grup variabel tak berdimensi dengan menggunakan dimensi primer lainnya, yaitu F, L, dan T.

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2} = \frac{FL}{t} \cdot \frac{L^4}{Ft^2} \cdot \frac{t^3}{L^3} \cdot \frac{1}{L^2} = 1$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D} = \frac{Ft}{L^2} \cdot \frac{L^4}{Ft^2} \cdot \frac{t}{L} \cdot \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_3 = \frac{L}{D} = L \cdot \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D} = L \cdot \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_5 = \frac{H}{D} = L \cdot \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_6 = \frac{a}{D} = L \cdot \frac{1}{L} = 1$$

Maka, grup variabel yang tak berdimensi tersebut adalah:

π_1 : *Coefficient of Power* (CoP)

π_2 : *Reynolds number*

π_3 : Rasio lebar pengganggu berupa plat datar dengan diameter sudu turbin angin Savonius.

- π_4 : Rasio proyeksi lebar plat pada turbin savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.
 π_5 : Rasio tinggi turbin savonius dengan diameter turbin savonius.
 π_6 : Rasio diameter overlap turbin savonius dengan diameter sudu turbin savonius.

Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{L}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{a}{D}\right)$$

Pada penelitian ini, variable tetapnya adalah $\frac{L}{D}, \frac{H}{D}, \frac{a}{D}$. Sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}$ dan $\frac{S}{D}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin. Sehingga dapat dituliskan:

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}\right)$$

dimana nilai dari $S = L \cos \alpha$ dan D sebanding dengan d ($D = \frac{d+a}{2}$), maka didapatkan nilai *Coefficient of Power*nya:

$$CoP = f_3(Re, \alpha)$$

3.3 Peralatan yang Digunakan

Pada penelitian kali ini ada beberapa peralatan yang di gunakan untuk menunjang pengambilan data eksperimen.

3.3.1 Wind Tunnel (Terowongan Angin)

Penggunaan wind tunnel dimaksudkan agar dapat menguji benda kerja dalam skala model. Hal ini di karenakan dalam pengujian dengan ukuran yang sebenarnya membutuhkan biaya dan ruang yang tidak sedikit. Pengujian dengan skala model dilakukan untuk memepertimbangkan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasil yang di dapat cukup akurat dan mendekati yang diharapkan.

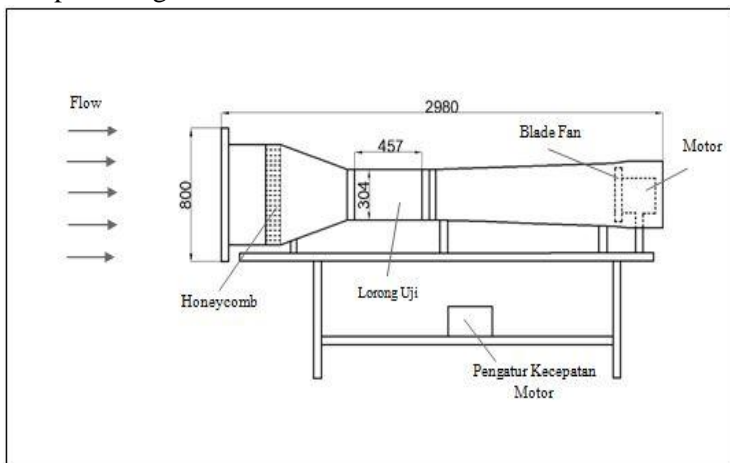
Spesifikasi *Wind Tunnel*

Jenis *wind tunnel* : *subsonic, open circuit wind tunnel*

Bentuk saluran uji : penampang segi delapan

- Panjang : 457 mm
- Tinggi : 304 mm
- Lebar : 304 mm

Kecepatan angin maksimal di dalam wind tunnel : 20 m/s

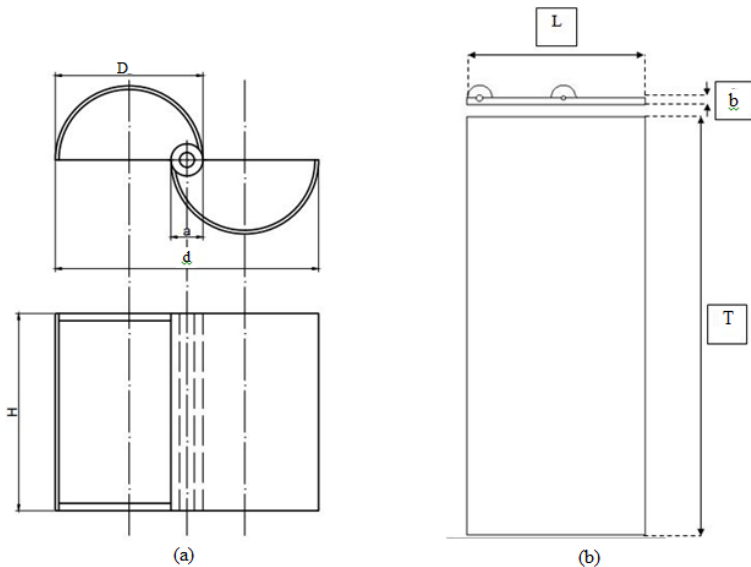


Gambar 3.2 Skema *Wind Tunnel Sub Sonic*

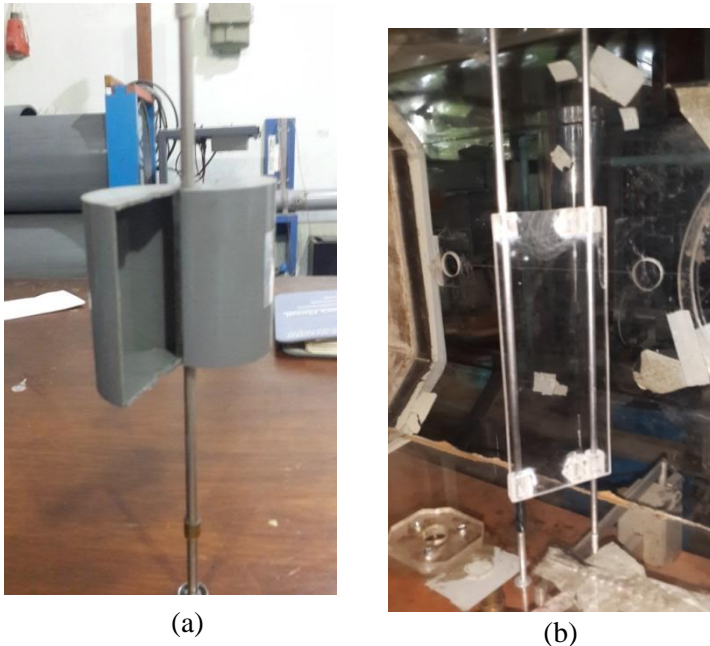
3.3.2 Benda Uji

Pada penelitian ini, benda uji yang digunakan adalah turbin angin tipe savonius dengan pengganggu berupa plat datar.

- a. Profil turbin angin tipe *Savonius* sebagai berikut :
 - Diameter sudu turbin (D) : 60 mm
 - Tinggi (H) : 80 mm
 - Diameter turbin (d) : 106 mm
 - Overlap diameter (a) : 14 mm
- b. Profil plat datar pengganggu sebagai berikut :
 - Lebar (L) : 60 mm
 - Tinggi (T) : 150 mm
 - Tebal plat (b) : 3 mm



Gambar 3.3 Skema Benda Uji (a) Turbin Angin *Savonius*, (b) Plat datar sebagai Pengganggu



Gambar 3.4 Foto Benda Uji (a) Turbin Angin Savonius, (b) Plat datar sebagai Pengganggu

3.3.3 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (N.m) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*.

a. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Tachometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA*** seri HHT12 dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit.



Gambar 3.5 Tachometer OMEGA seri HHT12

b. Torquemeter

Torquemeter merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi dari suatu objek. Torque meter yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.



Gambar 3.6 Torquemeter LUTRON model : TQ-8800

c. Thermometer

Thermometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur temperatur udara pada area *test section*, dan juga dipakai dalam penentuan densitas dan viskositas absolut udara.



Gambar 3.7 Thermometer

d. Pitot Static Tube

Pitot static tube digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi dan tekanan statis aliran yang nantinya akan dikonversi menjadi kecepatan aliran udara pada *wind tunnel*. *Pitot static tube* yang digunakan pada studi eksperimen ini terlihat seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pitot Static Tube

e. *Manometer*

Manometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur tekanan udara di dalam ruang tertutup. Manometer yang digunakan pada penelitian ini seperti yang terlihat pada gambar 3.9 dengan kemiringan 15° . Fluida kerja yang digunakan yaitu *red oil* dengan *specific gravity* 0,827.



Gambar 3.9 Manometer

f. *Multimeter*

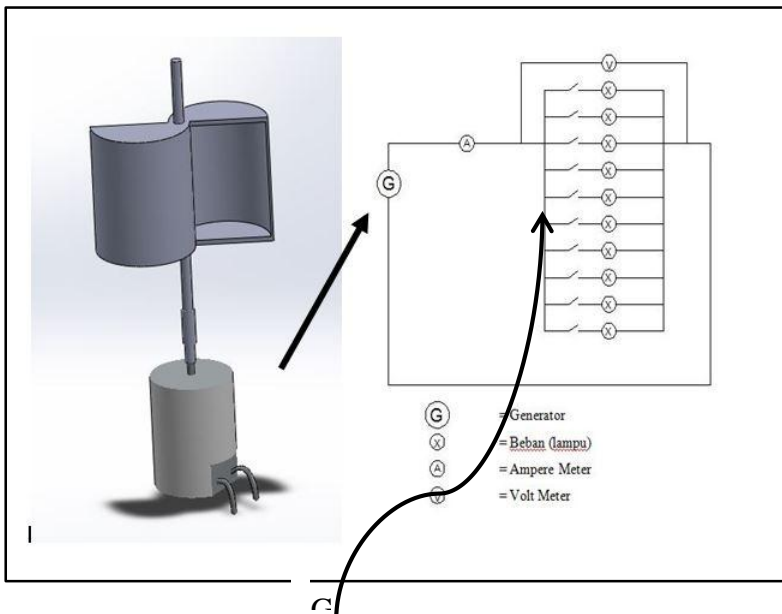
Multi meter merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur tegangan, hambatan, dan arus listrik. Multi meter yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Sanwa Multimeter Digital CD-771** dengan ketelitian 0.1% atau ± 1 digit.



Gambar 3.10 Sanwa Multimeter Digital CD-771

g. Pengukuran daya *output* turbin

Pada studi eksperimen ini untuk mengukur daya *output* dari turbin Savonius digunakan sebuah rangkaian elektronik. Poros turbin Savonius akan dihubungkan dengan poros generator listrik menggunakan *flexible coupling*. *Output* dari generator listrik akan diteruskan untuk menghidupkan beban beberapa lampu yang dipasang secara paralel. Pada rangkaian nantinya akan diukur nilai tegangan (Volt) dan arus listrik (Ampere) yang akan digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai daya *output* turbin. Skema generator dan rangkaian beban dapat dilihat pada gambar 3.11.



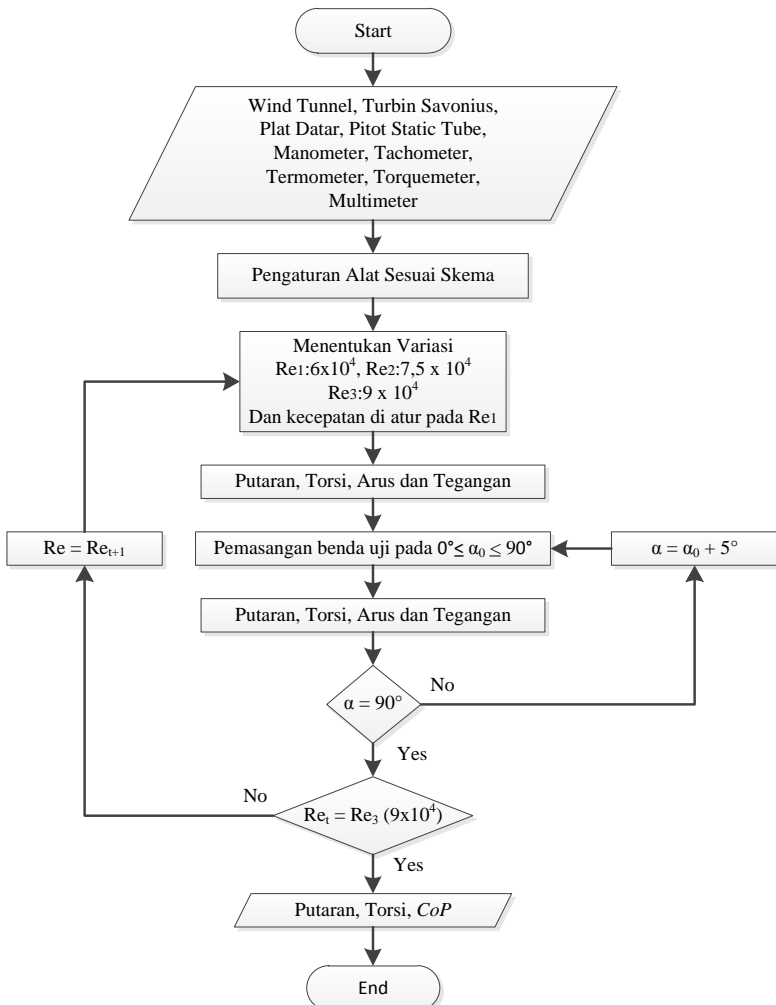
Gambar 3.11 Rangkaian Generator dan Beban Lampu

3.4 Prosedur Penelitian

Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian kali ini :

1. Perencanaan peralatan yang akan digunakan.
2. Pemasangan benda uji berupa turbin angin *Savonius* pada *test section* (di *wind tunel*.)
3. Menyalakan fan dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan inverter sehingga didapatkan nilai kecepatan dalam *test section* sesuai yang di harapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dan kecepatan angin dengan menggunakan *Thermometer* dan *Pitot Tube* sehingga diperoleh bilangan Reynolds 6×10^4 .
5. Melakukan pengukuran putaran poros turbin dengan menggunakan *Tachometer*.
6. Melakukan pengukuran torsi dengan menggunakan *Torque meter*.
7. Sambungkan poros turbin angin *Savonius* dengan generator listrik.
8. Melakukan pengukuran tegangan dan hambatan listrik pada generator menggunakan Multi meter.
9. Mematikan fan.
10. Mengulangi langkah 3 sampai 9 dengan merubah bilangan Reynolds menjadi $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 .
11. Memasang plat pengganggu di depan *returning blade* dengan sudut 0° terhadap arah aliran fluida.
12. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan mengubah sudut plat pengganggu sebesar $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ$, dan 90° .
13. Mematikan *fan*.
14. Mengolah semua data yang di peroleh (putaran dan torsi) dan menyajikan dalam bentuk grafik *Coefficient of Power* (*Cop*) terhadap sudut plat pengganggu.

3.5 Flowchart Penelitian



Gambar 3.12 Flowchart Penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada studi eksperimen yang telah dilakukan didapatkan beberapa data yang menunjukkan pengaruh pemberian plat didepan sisi returning blade turbin savonius terhadap performa turbin angin *Savonius*. Data yang di dapatkan terdiri dari nilai putaran (n), torsi statis (T) dan *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* dengan dan tanpa diberikan plat pengganggu di depan sisi *returning blade*. Data tersebut berdasarkan hasil penelitian dengan variasi nilai bilangan *Reynolds* aliran udara yang melewati turbin *Savonius* dan penempatan sudut plat pengganggu terhadap bidang tegak lurus aliran udara.

4.1 Contoh Perhitungan

Pada saat pengambilan data pada penelitian ini digunakan udara sebagai fluida kerja dengan mengasumsikan aliran tersebut *steady* dan *incompressible* dengan nilai sebagai berikut :

1. Tekanan absolute udara dalam keadaan standar (P_{std}) = $1,01325 \text{ N/m}^2$
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_{std}) = $288,2 \text{ K}$
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = $1,225 \text{ kg/m}^3$
4. Panjang karakteristik turbin Savonius (d) = 106 mm

Data standar udara diatas akan digunakan dalam perhitungan pengambilan data pada penelitian ini. Adapun tahapan-tahapan perhitungan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

- **Massa Jenis Udara (ρ)**

Untuk mendapatkan nilai massa jenis udara pada saat pengujian digunakan persamaan Boyle-Gay Lussac mengenai pemuaian gas. Dari persamaan tersebut didapatkan bahwa :

$$\frac{P_{\text{std}} \times V_{\text{std}}}{T_{\text{std}}} = \frac{P_{\text{uji}} \times V_{\text{uji}}}{T_{\text{uji}}} \quad (4.1)$$

Karena nilai $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan 4.1 berubah menjadi :

$$\frac{P_{\text{std}} \times m_{\text{std}}}{T_{\text{std}} \times \rho_{\text{std}}} = \frac{P_{\text{uji}} \times m_{\text{uji}}}{T_{\text{uji}} \times \rho_{\text{uji}}} \quad (4.2)$$

dimana :

- m_{std} = massa udara pada keadaan standar
- m_{uji} = massa udara pada saat pengujian
- P_{uji} = tekanan udara pada saat pengujian
- T_{uji} = temperature ruangan pada saat pengujian (25°C = 298 K) dan diasumsikan konstan pada saat pengujian
- ρ_{std} = massa jenis udara pada keadaan standar
- ρ_{uji} = massa jenis udara pada saat pengujian

Bila pengujian dilakukan dalam keadaan standar dan pada ketinggian yang sama, maka berlaku sebagai berikut:

$$P_{\text{std}} = P_{\text{uji}} \quad (4.3)$$

Dan karena massa udara dalam keadaan standar dan pada saat pengujian memiliki nilai yang sama, maka:

$$m_{\text{std}} = m_{\text{uji}} \quad (4.4)$$

Dari batasan diatas, maka persamaannya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\rho_{\text{uji}} = \frac{T_{\text{std}} \times \rho_{\text{std}}}{T_{\text{uji}}} \quad (4.5)$$

$$\rho_{\text{uji}} = \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{298 \text{ K}} = 1,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Viskositas Absolut Udara (μ)**

Untuk mendapatkan nilai viskositas absolut udara pada saat pengujian digunakan persamaan Sutherland. Dari persamaan tersebut didapatkan bahwa :

$$\mu_{uji} = \frac{b \times (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.6)$$

dimana :

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{Kg}{m.s.K^{0,5}}$$

$$S = 110,4 K$$

Pengujian dilakukan dengan temperatur ruangan $25^\circ C = 298 K$ maka perhitungannya sebagai berikut :

$$\mu_{uji} = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (298K)^{0,5}}{1 + \frac{110,4 K}{298 K}} = 1,837 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

- **Kecepatan Freestream Udara (U_∞)**

Dengan nilai massa jenis dan viskositas absolut udara yang telah didapatkan dalam perhitungan sebelumnya, nilai bilangan *Reynolds* = 90.000 dan nilai panjang karakteristik turbin Savonius sebesar 0,106 m maka dapat diketahui nilai kecepatan freestream udara dengan perhitungan seperti dibawah ini :

$$U_\infty = \frac{Re \times \mu}{\rho_{uji} \times d} \quad (4.7)$$

$$U_\infty = \frac{90000 \times 1,837 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,185 \frac{kg}{m^3} \times 0,106 m}$$

$$U_\infty = 13,16 m/s$$

- **Kenaikan Ketinggian Manometer**

Pada penelitian ini digunakan static pitot tube dan manometer untuk mendapatkan tekanan dinamis aliran udara yang akan dipakai untuk menghitung kecepatan freestream aliran udara. Manometer yang digunakan pada penelitian ini menggunakan fluida kerja *red oil* dengan *specific gravity* 0,827 dengan kemiringan 15°. Untuk mendapatkan aliran udara dengan kecepatan yang diinginkan dilakukan perhitungan kenaikan ketinggian manometer dengan menggunakan hukum Bernoulli, seperti dibawah ini:

$$\frac{P_{\text{statis}}}{\rho} + \frac{V_{\text{statis}}^2}{2} + gz_{\text{statis}} = \frac{P_{\text{stagnasi}}}{\rho} + \frac{V_{\text{stagnasi}}^2}{2} + gz_{\text{stagnasi}} \quad (4.8)$$

Karena ketinggian titik stagnasi dan statis dianggap sama dan kecepatan stagnasi sama dengan nol, maka persamaan diatas akan berubah menjadi seperti berikut:

$$\frac{P_{\text{statis}}}{\rho} + \frac{V_{\text{statis}}^2}{2} = \frac{P_{\text{stagnasi}}}{\rho} \quad (4.9)$$

$$V_{\text{statis}} = \sqrt{2 \times \frac{(P_{\text{stagnasi}} - P_{\text{statis}})}{\rho}} \quad (4.10)$$

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(P_{\text{stagnasi}} - P_{\text{statis}})}{\rho}} \quad (4.11)$$

Nilai $P_{\text{stagnasi}} - P_{\text{statis}}$ pada manometer ditunjukkan dengan kenaikan ketinggian manometer, maka persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(\rho_{\text{red oil}} \times g \times h)}{\rho}} \quad (4.12)$$

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(SG_{\text{red oil}} \times \rho_{\text{air}} \times g \times h)}{\rho}} \quad (4.13)$$

$$h = \frac{U_{\infty}^2 \times \rho}{2 \times SG_{\text{red oil}} \times \rho_{\text{air}} \times g} \quad (4.14)$$

$$h = \frac{(13,16 \frac{m}{s})^2 \times 1,185 \frac{kg}{m^3}}{2 \times 0,804 \times 997 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h = 13,06 \times 10^{-3} m$$

Manometer yang digunakan pada penelitian ini memiliki sudut 15° sehingga nilai kenaikan ketinggian yang terbaca pada manometer sebagai berikut:

$$x = \frac{h}{2 \times \sin 15^\circ} \quad (4.15)$$

$$x = \frac{13,06 \times 10^{-3} m}{2 \times \sin 15^\circ}$$

$$x = 25 \text{ mm}$$

4.1.2 Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*

Sebagai contoh dalam melakukan perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*, digunakan data-data yang didapat dalam pengujian turbin angin *Savonius* dengan nilai bilangan *Reynolds* sebesar 75.000 tanpa menggunakan plat pengganggu. Data yang digunakan dalam pengujian tersebut adalah sebagai berikut :

- Diameter sudu turbin *Savonius* (D) : 60 mm
- Tinggi turbin *Savonius* (H) : 80 mm
- Diameter overlap (a) : 14 mm
- Kecepatan freestream (U_∞) : 13,16 m/s

Dari data diatas maka daya input yang mengenai turbin dapat dihitung menggunakan persamaan energi kinetik sebagai berikut:

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (4.16)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times (\rho \times A \times U_\infty) \times U_\infty^2 \quad (4.17)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U_\infty^3 \quad (4.18)$$

Nilai A merupakan luas sapuan turbin yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A = d \times H = ((2 \times D) - a) \times H \quad (4.19)$$

Dalam pengujian yang telah dilakukan, turbin angin *Savonius* dihubungkan dengan generator listrik dan diberi beban sehingga menghasilkan nilai tegangan (V) dan arus listrik (I) yang diukur menggunakan multimeter. Data yang didapatkan dari pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- Tegangan listrik (V) : 1,768 Volt
- Arus listrik (I) : 10,24 mA DC
- Putaran dengan beban (n_b) : 648 rpm

Dari data diatas maka daya *output* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa daya *output* turbin *Savonius* merupakan daya *output* yang dihasilkan oleh generator listrik. Daya *output* tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{out} = V \times I \quad (4.20)$$

$$P_{out} = 1,768 \text{ V} \times 10,24 \text{ mA}$$

$$P_{out} = 18,104 \text{ mW}$$

Coefficient of Power (CoP) merupakan perbandingan antara daya *output* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* terhadap daya *input* yang menggerakkan turbin. Sehingga nilai *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{CoP} = \frac{P_g}{P_{in}} \quad (4.21)$$

$$\text{CoP} = \frac{V \times I}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times U_{\infty}^3} \quad (4.22)$$

$$\text{CoP} = \frac{V \times I}{\frac{1}{2} \times \rho \times ((2 \times D) - a) \times H \times U_{\infty}^3} \quad (4.23)$$

$$\text{CoP} = \frac{1,768 \text{ Volt} \times 10,24 \text{ mA}}{\frac{1}{2} \times 1,185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times ((2 \times 0,06 \text{ m}) - 0,014 \text{ m}) \times 0,08 \text{ m} \times (10,968 \text{ m/s})^3}$$

$$\text{CoP} = 0,0027 = 0,27\%$$

4.1.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (λ)

Tip speed ratio merupakan perbandingan kecepatan diujung turbin terhadap kecepatan aliran udara yang menggerakkan turbin. Pada perhitungan *tip speed ratio* ini digunakan nilai putaran turbin angin *Savonius* setelah dihubungkan dengan generator dan diberi beban. Perhitungan *tip speed ratio* dapat dilakukan dengan perumusan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{U_{\infty}} \quad (4.24)$$

$$\lambda = \frac{2 \times \pi \times n_b \times R}{60 \times U_{\infty}} \quad (4.25)$$

$$\lambda = \frac{2 \times 3,14 \times 648 \text{ rpm} \times 0,053 \text{ m}}{60 \times 10,968 \text{ m/s}}$$

$$\lambda = 0,327$$

4.2 Analisa Performa Turbin Angin *Savonius* Tanpa Plat Pengganggu

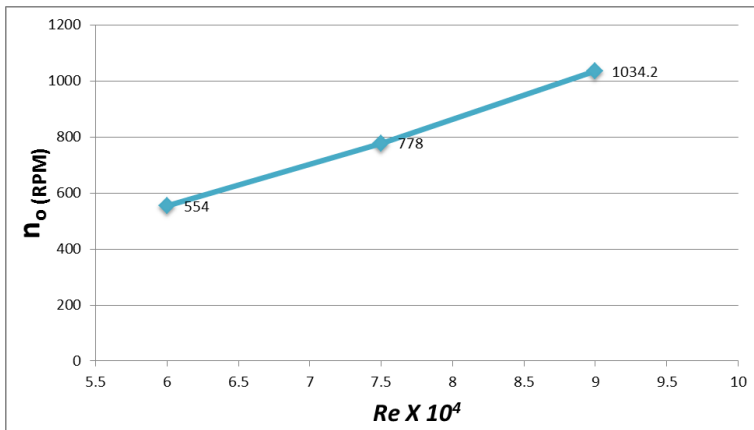
Pada bagian ini akan dilakukan analisa performa turbin angin *Savonius* tanpa menggunakan plat pengganggu. Analisa yang dilakukan meliputi pengaruh variasi bilangan *Reynolds* terhadap nilai putaran, torsi statis, dan *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Data yang telah diperoleh dalam pengujian akan disajikan dalam bentuk grafik putaran (n_o) terhadap bilangan *Reynolds*, grafik torsi statis (T_o) terhadap Bilangan *Reynolds*, grafik *Coefficient of Power* terhadap bilangan *Reynolds* dan grafik *Coefficient of Power* terhadap nilai *tip speed ratio*.

4.2.1 Putaran Turbin Angin *Savonius* (n_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa putaran turbin *Savonius* (n_o) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran putaran turbin angin *Savonius* tanpa diberikan plat penghalang dilakukan pada temperatur 25°C dengan menggunakan *tachometer* yang ditembakkan pada salah satu sudu dari turbin yang telah diberikan *scotlight* bewarna

perak. Data hasil pengukuran putaran turbin angin *Savonius* sebagai fungsi bilangan *Reynolds* dapat ditunjukkan dalam grafik 4.1.

Bedasarkan grafik pada gambar 4.1 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan putaran turbin angin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds*. Putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Dapat dilihat bahwa pada putaran turbin terendah terjadi pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 dan putaran tertinggi terjadi pada *Reynolds* number 9×10^4 . Hal ini disebabkan dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* maka kecepatan aliran udara yang mengenai turbin juga meningkat. Sehingga dengan meningkatnya kecepatan angin maka gaya drag yang diterima oleh kedua sudu turbin angin juga semakin meningkat. Dengan meningkatkan gaya drag yang diterima oleh turbin angin maka putaran dari turbin angin juga ikut meningkat.

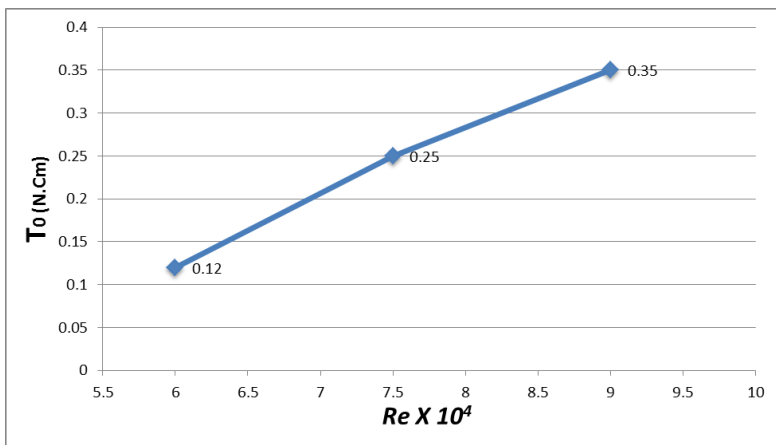


Gambar 4.1 Grafik putaran turbin *Savonius* (n_o) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re)

4.2.2 Torsi Statis (T_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T_o) turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran torsi turbin angin *Savonius* tanpa diberikan plat penghalang dilakukan pada temperature 25°C dengan menggunakan *torquemeter*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik 4.2.

Berdasarkan grafik pada gambar 4.2 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan torsi statis dari turbin angin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T_o) maksimal sebesar $0,12 \text{ N.cm}$, $0,25 \text{ N.cm}$, dan $0,35 \text{ N.cm}$. Terjadinya peningkatan torsi statis ini disebabkan oleh meningkatnya bilangan *Reynolds*, dan secara tidak langsung kecepatan aliran udara yang mengenai turbin angin juga meningkat. Hal tersebut menyebabkan nilai dari gaya *drag* yang di dalamnya terikat pada variabel kecepatan udara yang semakin meningkat sehingga torsi yang dibangkitkan juga kian meningkat.

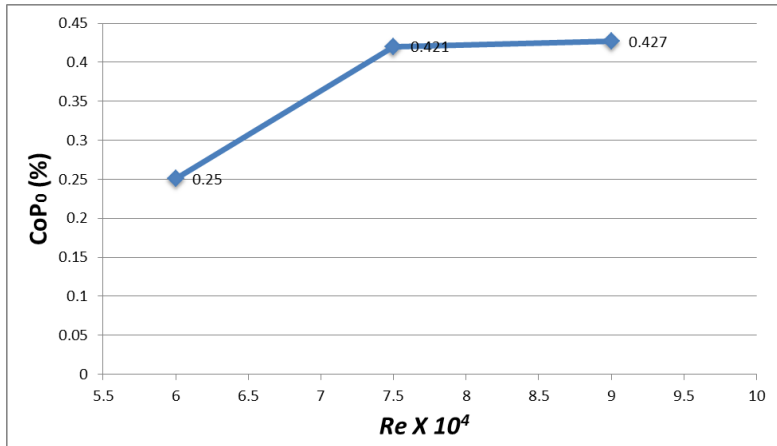


Gambar 4.2 Grafik Torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re)

4.2.3 *Coefficient of Power (CoP) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)*

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power (CoP_o)* Turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran *Coefficient of Power* pada turbin angin *Savonius* tanpa diberikan plat penghalang dilakukan pada temperatur 25 °C. Pengukuran daya *output* turbin dilakukan menggunakan multimeter yang dihubungkan pada generator listrik yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Dari pengukuran tersebut didapatkan nilai tegangan (V) dan arus listrik (I) yang dihasilkan generator. Nilai tegangan dan dan arus listrik yang telah didapatkan dihitung seperti yang dilakukan pada contoh perhitungan sehingga didapatkan nilai *Coefficient of Power* dari turbin angin *Savonius*. Hasil perhitungan *Coefficient of Power* dapat dilihat pada grafik yang terdapat pada gambar 4.3.

Bedasarkan gambar 4.3 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan *Coefficient of Power (CoP_o)* dari turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds*. Terlihat bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power (CoP_o)* sebesar 0,25%, 0,421%, dan 0,427%. Terjadinya peningkatan *Coefficient of Power (CoP_o)* seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds* disebabkan oleh peningkatan aliran udara yang mengenai turbin angin. *Coefficient of Power* adalah rasio antara daya *output* dari turbin angin terhadap daya *input* dari energi angin. Bila kecepatan aliran udara dalam *wind tunnel* meningkat, maka daya *input* dan *output* turbin juga kan meningkat, tetapi peningkatan daya *output* cenderung lebih besar daripada peningkatan dari daya *input*. Hal ini mengakibatkan *Coefficient of Power* cenderung meningkat bila bilangan *Reynolds* juga meningkat.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

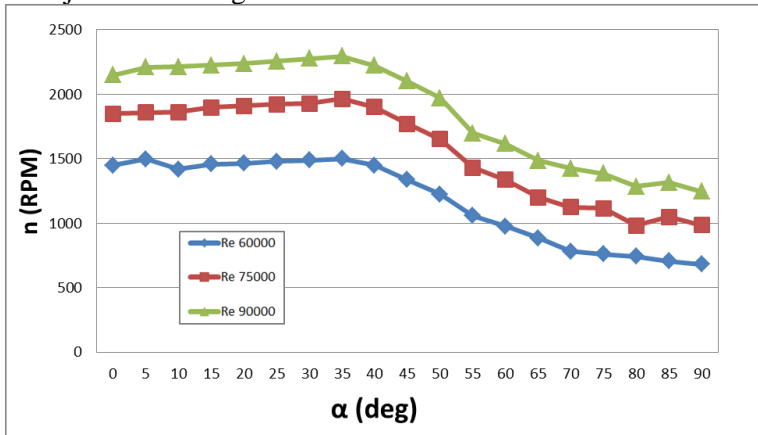
4.3 Analisis Performa Turbin *Savonius* yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ pada bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4

Pada studi eksperimen kali ini dilakukan peningkatan performa dari turbin angin *Savonius* dengan memberikan sebuah pengganggu berupa plat datar berbentuk persegi panjang dengan nilai $L/D = 1$ diletakkan di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dengan variasi perubahan sudut (α). Sudut penempatan plat datar pengganggu divariasikan dari 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

4.3.1 Putaran Turbin Angin *Savonius* (n) sebagai Fungsi sudut Halang (α)

Setelah dilakukan eksperimen, didapat data berupa putaran turbin angin *Savonius* (n) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran putaran turbin angin *Savonius* (n) dilakukan dengan menggunakan

tachometer yang ditembakkan pada salah satu sudu dari turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik 4.4.



Gambar 4.4 Grafik putaran turbin *Savonius* (n) sebagai fungsi sudut halang (α)

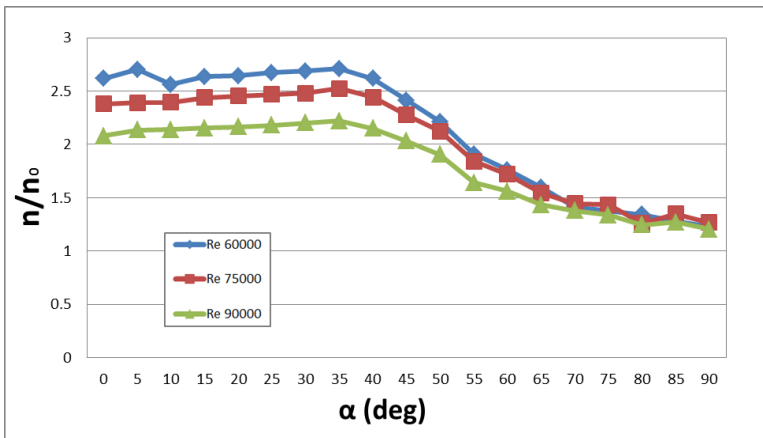
Dapat dilihat dari grafik pada gambar 4.4 di tunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada tiga variasi bilangan *Reynolds* terhadap variasi sudut penempatan plat pengganggu. Putaran yang dihasilkan meningkat lebih tinggi seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds* dan setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan putaran turbin yang kemudian mengalami penurunan.

Pada gambar 4.4 terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* pada setiap variasi bilangan *Reynolds* memiliki *trendline* yang cenderung meningkat pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , putaran awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 1449 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang

sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 1502 rpm dan setelah sudut tersebut, putaran cenderung menurun hingga 682.2 rpm pada sudut 90° . kemudian Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, putaran awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 1851 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 1965 rpm dan setelah sudut tersebut, putaran cenderung meurun hingga 985.5 rpm pada sudut 90° dan pada variasi bilangan *Reynolds* 9×10^4 , putaran awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 2150 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 2296 rpm dan setelah sudut tersebut, putaran cenderung menurun hingga 1245 rpm pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 35° terjadi kenaikan putaran dari turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* menyebabkan penurunan gaya drag yang diterima oleh sudu *returning blade*, dan di sisi lain arah plat datar pengganggu pada sudut 5° hingga 35° akan membentuk suatu sudut, yang dimana akan mengarahkan arah aliran udara ke sisi *advancing blade*. Hal ini menyebabkan gaya drag yang diterima sisi *advancing* akan meningkat sehingga selisih torsi dari kedua sudu juga meningkat dan terjadi kenaikan putaran pada turbin angin *Savonius*. Sedangkan pada sudut penempatan plat datar penghalang dari posisi 35° hingga 90° terjadi penurunan putaran dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan oleh variasi bukaan sudut plat datar pengganggu yang semakin besar sehingga aliran udara sudah mulai banyak yang melewati sisi luar pengganggu dan mengenai sisi *returning blade*. Hal ini membuat aliran angin menuju sisi *returning blade* meningkat, sehingga gaya drag yang diterima pada sisi *returning blade* akan meningkat seiring dengan bertambahnya bukaan sudut plat datar pengganggu.

Dari data sebelumnya pada turbin angin *Savonius* yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 554 rpm, 778 rpm, dan 955 rpm. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin angin *Savonius* yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut.

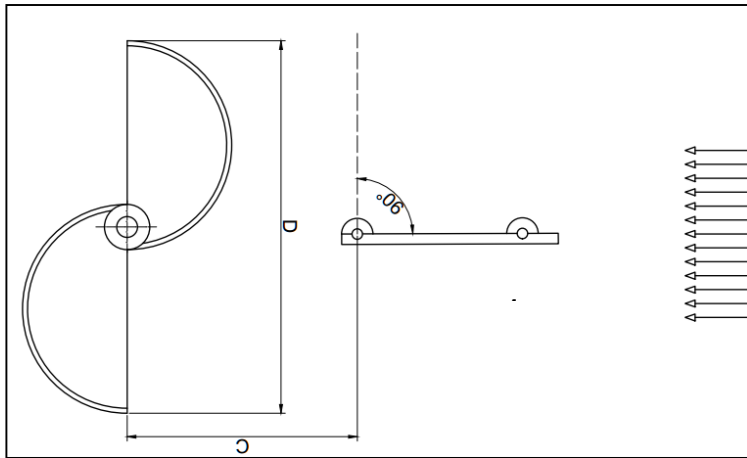


Gambar 4.5 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_0) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada gambar 4.5 terlihat bahwa perbandingan putaran turbin (n/n_0) tiap *trendline* akan cenderung meningkat pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 35° dan selanjutnya akan menurun hingga sudut 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan putaran turbin angin *Savonius* (n/n_0) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 2,61 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° yang kemudian cenderung mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,71 kali lipat dan selanjutnya akan menurun hingga pada sudut 90° dengan nilai perbandingan putaran turbin sebesar 1,23

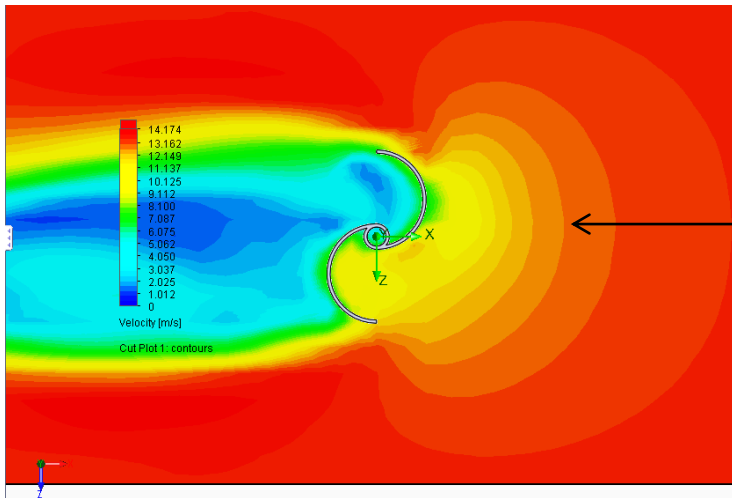
kali lipat. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan putaran turbin angin *Savonius* (n/n_o) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 2,38 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° yang kemudian cenderung mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,52 kali lipat dan selanjutnya akan menurun hingga pada sudut 90° dengan nilai perbandingan putaran turbin sebesar 1,26 kali lipat. Dan yang terakhir pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan putaran turbin angin *Savonius* (n/n_o) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 2,08 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° yang kemudian cenderung mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,22 kali lipat dan selanjutnya akan menurun hingga pada sudut 90° dengan nilai perbandingan putaran turbin sebesar 1,2 kali lipat. Dengan melihat grafik 4.5 dapat disimpulkan bahwa untuk semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $n/n_o > 1$, yang artinya pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* akan meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius*.

Adapun pada sudut penempatan plat datar pengganggu pada posisi 90° seperti gambar 4.6 didapatkan nilai $n/n_o > 1$, meskipun pada posisi tersebut turbin angin *Savonius* layaknya tanpa menggunakan pengganggu.

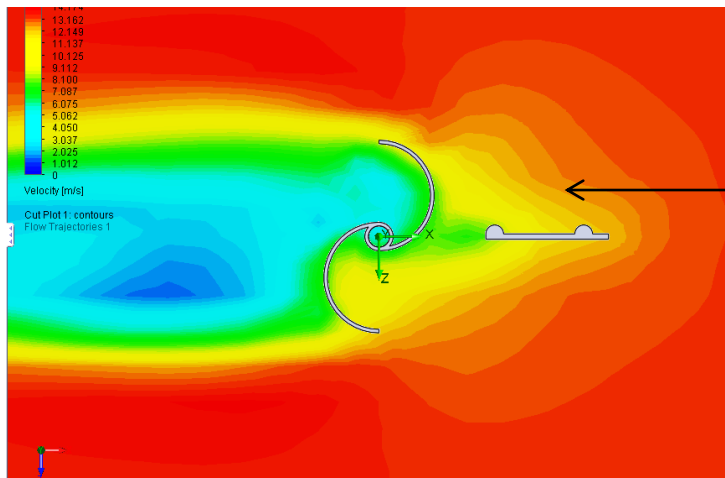


Gambar 4.6 Posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90°

Hal ini diduga karena adanya pola perilaku aliran yang akan membentuk daerah *wake* setelah terjadinya separasi di bagian *trailing edge* pada plat datar. Daerah *wake* tersebut akan menyebabkan tekanan di depan sudu turbin *Savonius* akan menurun, sehingga gaya *drag* pada sisi *returning blade* juga akan lebih kecil dibandingkan dengan tanpa menggunakan plat penghalang serta selisih torsi yang dihasilkan juga meningkat sehingga putaran turbin juga lebih tinggi. Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan adanya fenomena aliran yang terjadi pada turbin untuk konfigurasi tanpa plat datar pengganggu dan dengan adanya plat datar pengganggu di depan *returning blade* pada penempatan sudut 90° yang mana hal ini membuktikan terjadinya kenaikan performa turbin dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* pada penempatan sudut 90° ditunjukkan dengan adanya fenomena separasi aliran setelah mengenai plat datar yang mengakibatkan penurunan tekanan yang diterima oleh sisi *returning blade*, sehingga gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade* juga akan menurun, hal tersebut akan meningkatkan daya *output* dari turbin.

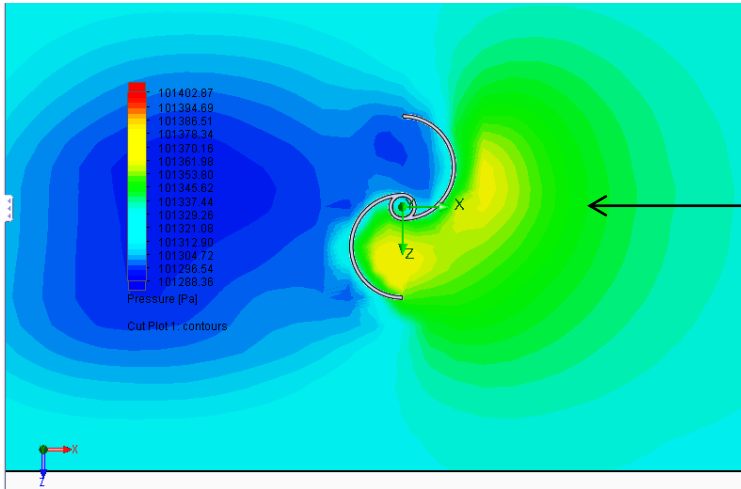


(a)

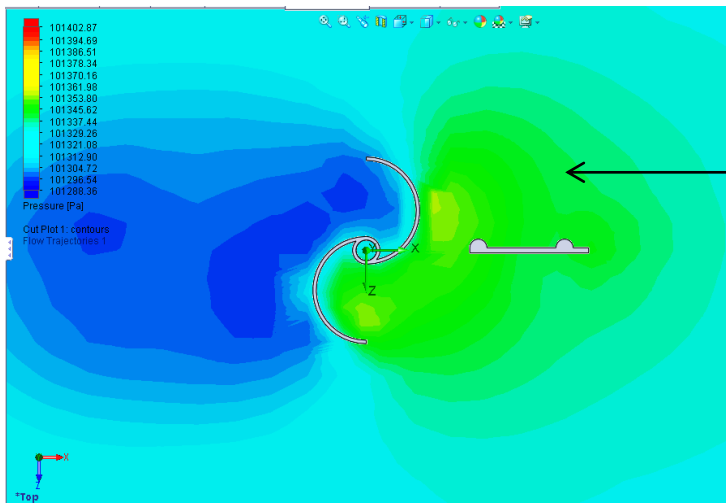


(b)

Gambar 4.7 Kontur kecepatan hasil simulasi turbin angin *Savonius* (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$



(a)



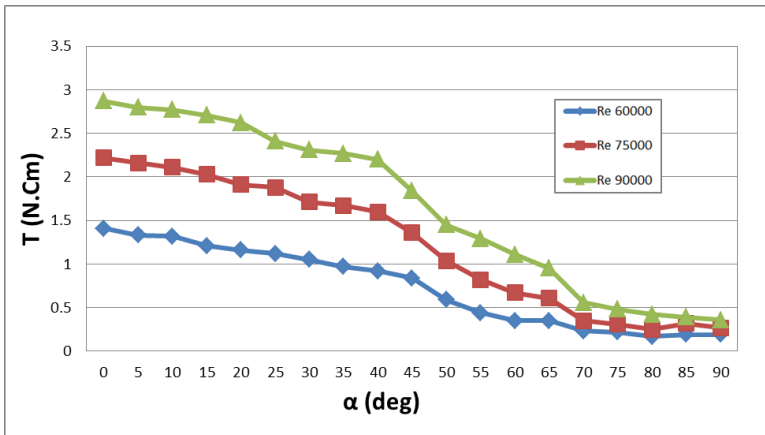
(b)

Gambar 4.8 Kontur *pressure* hasil simulasi turbin angin *Savonius* (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$

Fenomena aliran pada gambar 4.7 dan 4.8 memberikan visualisasi yang menjelaskan bahwa penempatan plat datar pengganggu pada sudut 90° juga memberikan peningkatan pada performa turbin angin *Savonius*. Pada gambar 4.7 dapat diamati dari warna kontur bahwa dengan diberikannya pengganggu pada sudut 90° terjadi fenomena penurunan kecepatan aliran pada sisi *returning blade* sehingga momentum aliran yang terjadi di depan sisi *returning blade* akan menurun, hal tersebut mengakibatkan putaran dari turbin *Savonius* meningkat. Di sisi lain, pada gambar 4.8 dapat diamati dari warna kontur bahwa dengan diberikannya pengganggu pada sudut 90° terjadi fenomena penurunan tekanan pada sisi depan *returning blade*, dan juga tidak terjadi perubahan peningkatan tekanan di sisi belakang dari *returning blade*, hal ini mengakibatkan perbedaan tekanan pada *returning blade* meningkat dari sebelum diberikannya penghalang. Fenomena tersebut memperkuat bukti bahwa dengan adanya penempatan plat datar pengganggu pada sudut 90° dapat meningkatkan nilai dari putaran (n) turbin angin *Savonius*.

4.3.2 Torsi Statis (T) sebagai fungsi Sudut Halang (α)

Setelah eksperimen dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran torsi statis (T) dari turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menahan sudu turbin pada sudut 0° dengan menggunakan *torquemeter*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik 4.9 sebagai berikut.



Gambar 4.9 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut halang (α)

Berdasarkan grafik pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa setiap *trendline* merepresentasikan torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap bukaan sudut plat datar pengganggu. Torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap *trendline* menunjukkan adanya penurunan torsi statis (T) seiring dengan bertambahnya bukaan sudut penempatan plat datar penghalang.

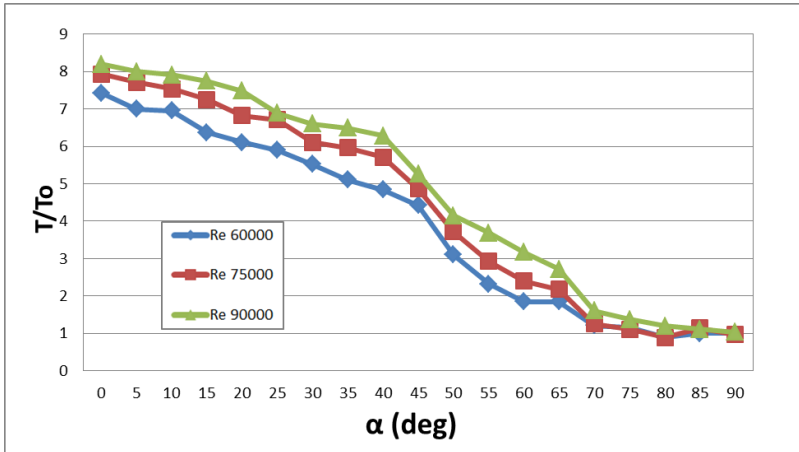
Pada gambar 4.9 terlihat bahwa torsi statis (T) mempunyai nilai yang lebih besar pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi, hal ini disebabkan dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* maka kecepatan aliran udara yang mengenai turbin angin *Savonius* juga meningkat, akibatnya gaya drag yang diterima oleh turbin angin juga meningkat, dan secara tidak langsung torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius* juga meningkat. Adapun hal lain yang dapat diamati dari grafik diatas yaitu penurunan tiap *trendline* pada bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu dari 0° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 torsi statis (T) maksimum terdapat pada posisi sudut

penempatan plat datar penganggu 0° yaitu bernilai 1.41 N.cm yang kemudian cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya bukaan posisi sudut plat pengganggu hingga mencapai nilai minimum yaitu pada sudut 90° dengan nilai torsi statis (T) sebesar 0.18 N.Cm. Selanjutnya pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$ torsi statis (T) maksimum terdapat pada posisi sudut penempatan plat datar penganggu 0° yaitu bernilai 2,22 N.cm yang kemudian cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya bukaan posisi sudut plat pengganggu hingga mencapai nilai minimum yaitu pada sudut 90° dengan nilai torsi statis (T) sebesar 0.27 N.Cm dan yang terakhir pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 torsi statis (T) maksimum terdapat pada posisi sudut penempatan plat datar penganggu 0° yaitu bernilai 2.87 N.cm yang kemudian cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya bukaan posisi sudut plat pengganggu hingga mencapai nilai minimum yaitu pada sudut 90° dengan nilai torsi statis (T) sebesar 0.35 N.Cm.

Fenomena penurunan *trendline* pada posisi sudut penempatan plat data penganggu dari posisi 0° hingga 90° dari torsi statis (T) turbin angin *Savonius* disebabkan oleh membesarnya bukaan plat pengganggu mengakibatkan titik pusat gaya (poros turbin) pada bagian *advancing blade* turbin angin *Savonius* mengalami perpindahan semakin menuju ke pusat sumbu turbin. Selain itu, variasi sudut plat datar penganggu yang semakin besar juga menyebabkan adanya aliran udara yang melewati sisi luar dari pengganggu dan akan mengenai *returning blade*. Hal ini mengakibatkan peningkatan gaya *drag* yang diterima oleh sisi *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* akan mengecil dan selisih torsi pun juga semakin kecil.

Dari data sebelumnya pada turbin *Savonius* yang tanpa diberikan plat datar penghalang pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T) maksimal sebesar 1,6 N.cm, 1,9 N.cm, dan 2 N.cm. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin *Savonius* yang

diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut.



Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada grafik di gambar 4.10 terlihat bahwa perbandingan torsi statis (T/T_0) tiap *trendline* akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut plat datar pengganggu dari 0° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) memiliki titik maksimum sebesar 7,4 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,12 kali lipat. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan torsi statis (T/T_0) memiliki titik maksimum sebesar 7,94 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,23 kali lipat. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) memiliki titik maksimum sebesar 8,2 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan

cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,1 kali lipat.

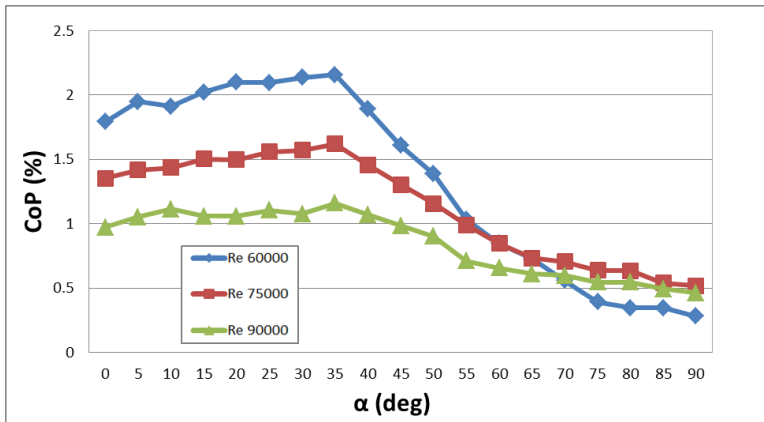
Terdapat fenomena bahwa pada posisi $\alpha \geq 70^\circ$ nilai dari perbandingan torsi statis (T/T_0) dari turbin *Savonius* hampir sama untuk seluruh variasi bilangan *Reynolds*. Posisi plat penghalang yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih banyak dan juga menyebabkan terjadinya penurunan gaya *drag* pada *returning blade*. Hal tersebut yang melandasi pada saat posisi $\alpha \geq 70^\circ$, perbandingan kenaikan gaya *drag* pada *advancing blade* dan penurunan gaya *drag* pada *returning blade* pada seluruh bilangan *Reynolds* memiliki harga yang hampir sama. Sehingga, selisih torsi yang dihasilkanpun mengalami peningkatan yang hampir sama. Selain itu, pada saat posisi $\alpha \geq 70^\circ$ juga menunjukkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 memiliki performa yang lebih baik dari variasi bilangan *Reynolds* yang lain.

Dapat dilihat dari semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $T/T_0 > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikannya plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan peforma dari turbin angin *Savonius*.

4.3.3 Coefficient of Power (CoP) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)

Setelah melakukan eksperimen, didapat data berupa *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . *Coefficient of Power* adalah rasio perbandingan daya *output* turbin angin terhadap daya *input* energi kinetik angin. . Pengukuran daya output turbin dilakukan menggunakan multimeter yang dihubungkan pada generator listrik yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Dari pengukuran tersebut didapatkan nilai tegangan (V) dan arus listrik (I) yang dihasilkan oleh generator listrik. Hasil perkalian antara nilai tegangan (V) dan arus listrik

(I) adalah nilai daya *output* turbin angin *Savonius*. Daya *output* ini nantinya akan dibandingkan dengan daya teoritis (daya *input*) untuk mendapatkan *Coefficient of Power (COP)*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik 4.11.



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi sudut halang (α)

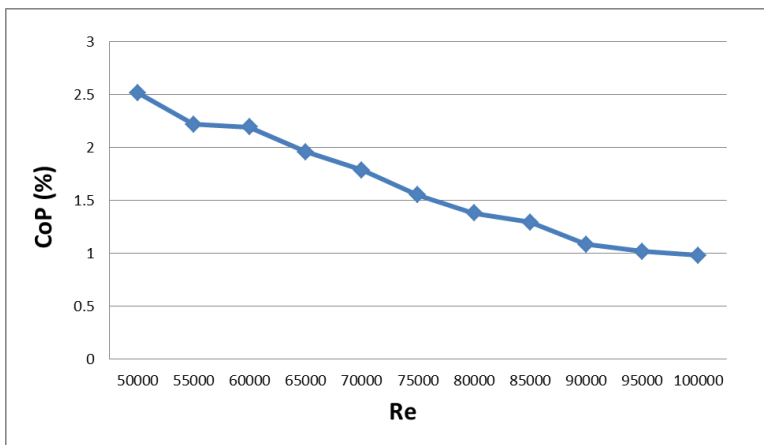
Pada grafik 4.11 terlihat bahwa *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin angin *Savonius* tiap *trendline* cenderung mengalami kenaikan pada posisi sudut penempatan plat penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung menurun mengalami penurunan pada posisi sudut penempatan plat penghalang dari 35° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° adalah sebesar 1,79% yang akan cenderung terus meningkat hingga nilai maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 2,16% dan setelah itu *trendline* cenderung menurun hingga pada nilai 0,28% yaitu terjadi pada sudut 90° . Kemudian Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° adalah sebesar 1,35% yang akan cenderung terus meningkat hingga nilai

maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 1,62% dan setelah itu *trendline* cenderung menurun hingga pada nilai 0,52% yaitu terjadi pada sudut 90° . Dan yang terakhir pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin pada posisi sudut penempatan plat datar pengganggu 0° adalah sebesar 0,97% yang akan cenderung terus meningkat hingga nilai maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 1,16% dan setelah itu *trendline* cenderung menurun hingga pada nilai 0,46% yaitu terjadi pada sudut 90° .

Pada grafik 4.11 dapat dilihat sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 35° terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* menyebabkan penurunan gaya drag yang diterima oleh sudu *returning blade*, dan di sisi lain arah plat datar pengganggu pada sudut 5° hingga 35° akan membentuk suatu sudut, yang dimana akan mengarahkan arah aliran udara ke sisi *advancing blade*. Hal ini menyebabkan gaya drag yang diterima sisi *advancing blade* akan meningkat sehingga selisih torsi dari kedua sudu juga meningkat dan terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* pada turbin angin *Savonius*, dan pada setiap variasi bilangan *reynolds* dapat dilihat bahwa nilai dari *Coefficient of Power (CoP)* maksimum didapat pada sudut 35° , hal tersebut terjadi karena pada sudut 35° plat datar pengganggu mengarahkan aliran angin secara optimum ke arah *advancing blade* sehingga peningkatan gaya drag yang diterima pada sisi tersebut maksimum, disamping itu pada sudut 35° celah atau bukaan sudu yang mengakibatkan adanya aliran mengenai sisi *returning blade* tidak terlalu berpengaruh pada peningkatan gaya drag pada *returning blade*, sehingga daya yang dihasilkan turbin angin *Savonius* akan meningkat secara signifikan setelah diberi plat datar pada penempatan sudut 35° . Sedangkan pada sudut penempatan plat datar penghalang dari posisi 35° hingga 90° terjadi penurunan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan oleh variasi bukaan sudut plat datar

pengganggu yang semakin besar sehingga aliran udara sudah mulai banyak yang melewati sisi luar pengganggu dan mengenai sisi *returning blade*. Hal ini membuat arah aliran angin menuju sisi *returning blade* meningkat, sehingga gaya drag yang diterima pada sisi *returning blade* akan meningkat seiring dengan bertambahnya bukaan sudut plat datar pengganggu.

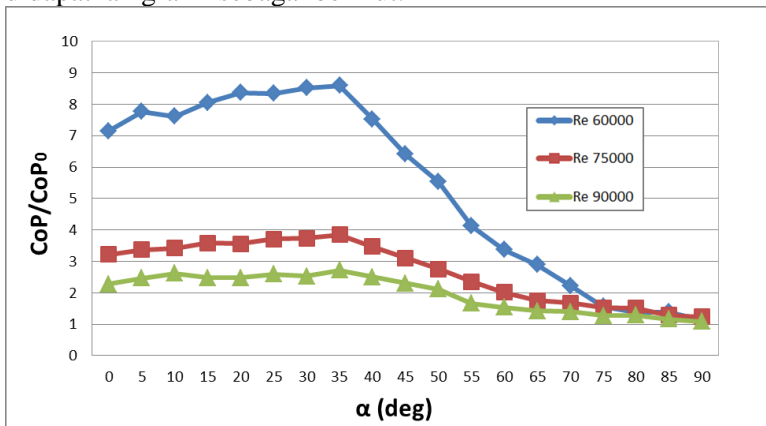
Fenomena lain yang terjadi adalah nilai *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 saat posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 90° memiliki nilai terendah dibandingkan yang lainnya. Hal ini dikarenakan daya *output* turbin yang dihasilkan sangat tidak sebanding dengan daya teoritis dari energi angin. Dan pada penempatan sudut plat datar pengganggu $\alpha \geq 65^\circ$ nilai *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 mengalami penurunan hingga dibawah nilai bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 , hal ini sesuai dengan keadaan standard sebelum turbin angin *Savonius* diberikan pengganggu yaitu bilangan *Reynolds* 6×10^4 nilai *Coefficient of Power* nya lebih kecil dari $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 .



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (*Re*) pada $\alpha = 35^\circ$

Grafik di gambar 4.12 merupakan *trendline Coefficient of Power (CoP)* dengan variasi bilangan *Reynolds* 5×10^4 hingga 10^5 dengan kenaikan 5000 serta penempatan plat datar pengganggu pada sudut 35° . Pada grafik 4.12 dapat diamati bahwa *Coefficient of Power (CoP)* maksimum terjadi pada bilangan *Reynolds* 5×10^4 yang menghasilkan *CoP* maksimum sebesar 2,78%. Setelah itu untuk $Re > 5 \times 10^4$ nilai *CoP* cenderung mengalami penurunan. Grafik 4.12 juga menjelaskan mengapa bilangan *Reynolds* 6×10^4 memiliki nilai *Coefficient of Power (CoP)* yang lebih tinggi dibandingkan dengan bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 (bedasarkan grafik 4.11), hal ini dikarenakan nilai bilangan *Reynolds* 6×10^4 mendekati nilai bilangan *Reynolds* optimum turbin yaitu 5×10^4 yang dimana mempunyai nilai *Coefficient of Power (CoP)* maksimum.

Dari perhitungan sebelumnya pada turbin angin *Savonius* yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power (CoP)* maksimal sebesar 0,25%, 0,42%, dan 0,426%. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* ($CoP/CoPo$) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada grafik di gambar 4.13 terlihat bahwa perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin angin *Savonius* tiap *trendline* akan cenderung mengalami peningkatan pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° . Hal ini dikarenakan pada bukaan sudut 0° hingga 35° *Coefficient of Power* dari turbin angin *Savonius* mengalami peningkatan seiring dengan penambahan bukaan sudut pengganggu dan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° *Coefficient of Power* dari turbin angin *Savonius* mengalami penurunan. Dengan melihat hal tersebut *Trend* peningkatan dari *Coefficient of Power* pada grafik 4.11 juga sebanding dengan peningkatan nilai perbandingan *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* (CoP/CoP_o) awal dari turbin angin *Savonius*.

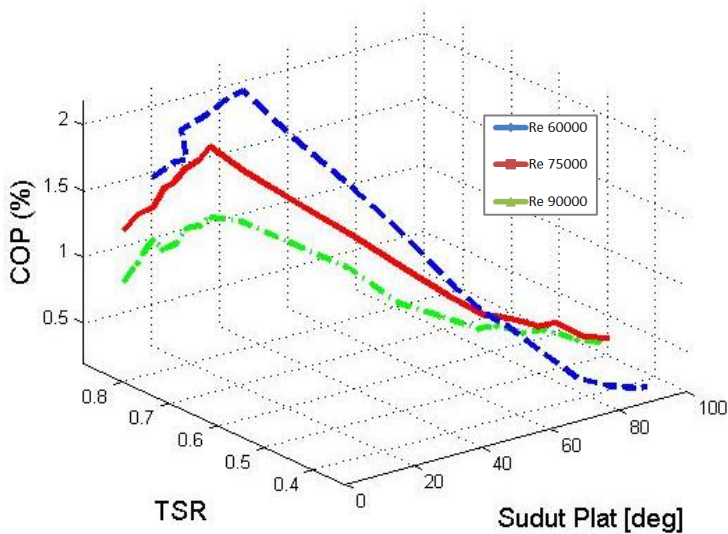
Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* (CoP/CoP_o) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 7,1 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 8,59 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,12 kali lipat pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_o) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 3,2 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 3,85 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,23 kali lipat pada sudut 90° . Dan yang terakhir pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_o) awal dari turbin angin *Savonius* sebesar 2,28 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35°

dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,71 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,08 kali lipat pada sudut 90° .

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $CoP/CoP_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* dapat meingkatkan performa dari turbin *Savonius*.

4.3.4 Coefficient of Power (CoP) sebagai fungsi Tip Speed Ratio (TSR)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa daya *output* turbin *Savonius* yang dikonversikan menjadi *Coefficient of Power* (*CoP*) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 dan dibandingkan dengan besar dari *Tip Speed Ratio* (*TSR*). Pengukuran daya *output* dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan (V) dan arus (I) yang diukur pada generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*). Adapun *Tip Speed Ratio* (*TSR*) adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan melalui pengukuran kecepatan putar dari turbin angin *Savonius* saat turbin terhubung dengan rangkaian generator dan beban lampu yang dibandingkan dengan kecepatan aliran angin. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik 4.14.



Gambar 4.14 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR)

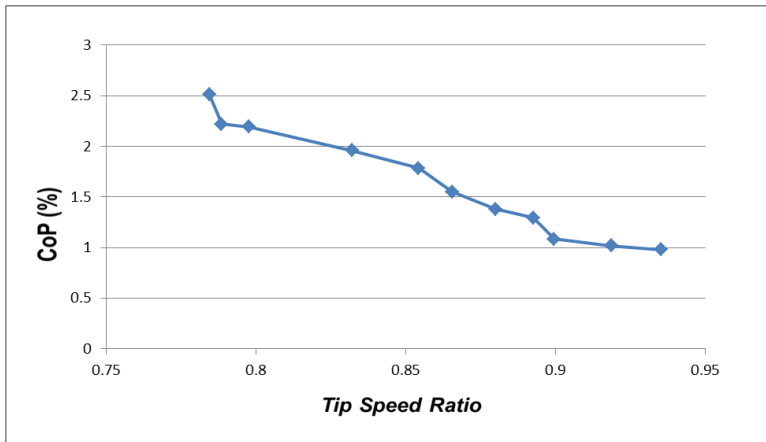
Berdasarkan pada gambar 4.14 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dibandingkan dengan nilai dari *Tip Speed Ratio* (TSR). Setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan *Coefficient of Power* turbin angin Savonius (*CoP*) seiring dengan bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio* (TSR).

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) tiap *trendline* akan cenderung mengalami peningkatan. Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , *CoP* memiliki titik minimum yaitu 0,28 % pada saat TSR sebesar 0,34 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada TSR sebesar 0,79 dengan *CoP* turbin sebesar 2,15 %. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *CoP* memiliki titik minimum yaitu 0,51 % pada saat TSR sebesar 0,42 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada TSR sebesar 0,86 dengan *CoP* turbin sebesar 1,62 %. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *CoP* memiliki titik minimum yaitu

0,46 % pada saat *TSR* sebesar 0,44 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada *TSR* sebesar 0,86 dengan *CoP* turbin sebesar 1,09 %.

Adapun peningkatan *Coefficient of Power (CoP)* disebabkan oleh terjadinya kenaikan putaran dan torsi dari turbin angin *Savonius* yang menyebabkan daya *output* semakin meningkat, sedangkan daya *input* dari aliran angin akan tetap sama. Kenaikan putaran dan torsi dari turbin angin *Savonius* dipengaruhi oleh penurunan gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang disebabkan oleh plat datar pengganggu. Sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu semakin besar, hal itu menyebabkan torsi yang dihasilkan semakin besar. Pada gambar 4.14 ini terlihat bahwa *Coefficient of Power (CoP)* tertinggi didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , hal tersebut sudah sesuai dengan gambar 4.12 seperti yang sudah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

Betz Law menjelaskan tentang karakteristik *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin dan menyatakan bahwa *CoP* tidak selalu mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *TSR* yang disebabkan oleh bertambah besarnya bilangan *Reynolds*. Oleh karena itu dilakukan eksperimen kembali terhadap turbin *Savonius* yang berputar pada variasi bilangan *Reynolds* antara 5×10^4 hingga 1×10^5 dengan kenaikan nilai sebesar 5000 serta plat datar pengganggu diletakkan pada sudut 35° . Hasil yang didapatkan tertera pada gambar di bawah ini



Gambar 4.15 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (*TSR*) pada $\alpha = 35^\circ$

Pada penelitian kali ini digunakan variasi bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Sedangkan pada gambar 4.15, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) akan cenderung menurun dari $TSR=0,78$ hingga $TSR=0,93$. Pada $TSR=0,78$, *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin Savonius sebesar 2,51% yang kemudian cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada $TSR=0.93$ dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 0,97%.

Pada penelitian ini terbukti bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) terbaik didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 dikarenakan TSR mencapai nilai sebesar 0,79 untuk penempatan posisi sudut halang sebesar 35° . Sedangkan pada grafik tersebut menunjukkan bahwa sesungguhnya konfigurasi dari eksperimen memiliki titik efisiensi kerja maksimum pada *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 0,78.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan tentang hasil penelitian pengaruh sudut plat pengganggu didepan *returning blade* turbin angin tipe Savonius terhadap performa turbin didapatkan beberapa kesimpulan antara lain:

1. Pemberian plat pengganggu dengan $L/D=1$ didepan *returning blade* turbin Savonius dapat meningkatkan kinerja turbin Savonius yang diteliti ditandai dengan meningkatnya nilai putaran, torsi statis, dan *Coefficient of Power* yang dihasilkan turbin pada semua sudut plat pengganggu.
2. Plat pengganggu dengan $L/D=1$ paling efektif digunakan untuk meningkatkan putaran turbin Savonius bila diletakkan pada sudut 35° dan Reynolds Number 6×10^4 dengan kenaikan mencapai 2,71 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu.
3. Plat pengganggu dengan $L/d=1$ paling efektif digunakan untuk meningkatkan torsi statis turbin Savonius bila diletakkan pada sudut 0° dan Reynold Number 9×10^4 dengan kenaikan mencapai 8,2 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu.
4. Plat pengganggu dengan $L/d=1$ paling efektif digunakan untuk meningkatkan *Coefficient of Power* turbin Savonius bila diletakkan pada sudut 35° dan Reynolds Number 6×10^4 dengan kenaikan mencapai 8,59 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu.
5. Nilai *Coefficient of Power* dengan penempatan sudut penghalang 35° selalu menurun pada bilangan Reynolds 5×10^4 hingga 10^5 , didapatkan *CoP* maksimal sebesar 2,5% pada $Re \ 5 \times 10^4$.
6. Nilai *Coefficient of Power* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds pada nilai 6×10^4 hingga 9×10^4 .

7. Nilai dari *Coefficient of Power* yang dihasilkan sangat kecil dimana hasil maksimal hanya sebesar 2,5% hal ini dikarenakan pengukuran dilakukan pada daya *output* generator bukan daya *output* dari poros turbin langsung, dan *blockage effect* yang tidak di perhitungkan juga memberikan pengaruh pada hasil tersebut.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan mungkin berguna untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Dimensi dari turbin angin *Savonius* dalam eksperimen ini terlalu besar sehingga melanggar ketentuan dari penggunaan *windtunnel* yaitu *blockage ratio* sebesar 12%. Hal tersebut menimbulkan efek *blockage* pada rongga *wind tunnel* yang digunakan, maka perlu dilakukan eksperimen ulang dengan mereduksi dimensi turbin angin *Savonius* ataupun memanfaatkan *windtunnel* dengan rongga yang lebih besar sehingga ketentuan *blockage ratio* masih dalam batas toleransi.
2. Pengukuran torsi sebaiknya dilakukan pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin bukan torsi statis sehingga dapat diketahui hubungan antara putaran, torsi dan *Coefficient of Power* yang dihasilkan turbin angin *Savonius*.
3. Pengukuran *Coefficient of Power* sebaiknya diukur langsung dari poros turbin, sehingga tidak dipengaruhi oleh efisiensi generator listrik.
4. Pengukuran *Coefficient of Power* sebaiknya mengukur *brake horse power (bhp)* dari generator listrik, sehingga memperhitungkan nilai efisiensi dari generator listrik tersebut.

DAFTAR PUSAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M, Ozdamar, A., June 2008. "An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance with Curtaining". **Experimental Thermal and Fluids Science** 32, 8:1673-1678.
- Altan, B. D., Atilgan, M, September 2010. "The Use of Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors". **Renewable Energy** 35, 4:821 - 829.
- Fox, Robert W. Dan Mc.Donald, Alan T. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, 5th Edition**, John Wiley and Son, Inc.
- Khan, N.I., Iqbal, M.T., Hinchey, Michael, dan Masek, Vlastimil. 2009. Performance of Savonius Rotor As A Water Current Turbine. *Journal of Ocean Technology* Vol. 4, No. 2, pp. 71-83.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Theyenin, D., May 2010. "Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade". **Renewable Energy** 35, 11:2618 – 2626.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., July 2011. "Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade". **Energy Conversion and Management** 52, 1:236-242.
- Riswantarbi, Audiyatra., 2016. "Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan Returning Blade Terhadap Peforma Turbin Angin Savonius". Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

TABEL DATA STANDAR (TANPA PENGANGGU)

Re	n (RPM)	T (N.cm)	CoP	CoP (%)	TSR
60000	554	0.12	0.0025	0.25	0.30
75000	778	0.25	0.00420	0.42	0.35
90000	1034.2	0.35	0.00426	0.423	0.40

TABEL DATA PUTARAN

α	n (RPM)			n/n ₀		
	60000	75000	90000	60000	75000	90000
0	1449	1851	2150	2.6155	2.3791	2.0789
5	1497	1860	2210	2.7021	2.3907	2.1369
10	1420	1863	2213	2.5631	2.3946	2.1398
15	1460	1898	2227	2.6353	2.4395	2.1533
20	1465	1910	2237	2.6444	2.4550	2.1630
25	1480	1921	2256	2.6714	2.4691	2.1813
30	1488	1929	2276	2.6859	2.4794	2.2007
35	1502	1965	2296	2.7111	2.5257	2.2200
40	1449	1900	2223	2.6155	2.4421	2.1494
45	1336	1772	2102	2.4115	2.2776	2.0324
50	1226	1652	1971	2.2129	2.1233	1.9058
55	1058	1432	1698	1.9097	1.8406	1.6418
60	975.3	1337	1615	1.7604	1.7185	1.5615
65	885.5	1202	1485	1.5983	1.5449	1.4358
70	783.4	1125	1425	1.4140	1.4460	1.3778
75	761.6	1115	1385	1.3747	1.4331	1.3392
80	742.7	981.6	1286	1.3406	1.2616	1.2434
85	707.9	1049	1315	1.2777	1.3483	1.2715
90	682.2	985.5	1245	1.2314	1.2667	1.2038

TABEL DATA TORSI STATIS

α	T (N.cm)			T/T ₀		
	60000	75000	90000	60000	75000	90000
0	1.41	2.22	2.87	7.4210	7.9285	8.2
5	1.33	2.16	2.8	7	7.7142	8
10	1.32	2.11	2.77	6.9473	7.5357	7.9142
15	1.21	2.03	2.71	6.3684	7.25	7.7428
20	1.16	1.91	2.62	6.1052	6.8214	7.4857
25	1.12	1.88	2.41	5.8947	6.7142	6.8857
30	1.05	1.71	2.31	5.5263	6.1071	6.6
35	0.97	1.67	2.27	5.1052	5.9642	6.4857
40	0.92	1.6	2.2	4.8421	5.7142	6.2857
45	0.84	1.36	1.84	4.4210	4.8571	5.2571
50	0.59	1.04	1.45	3.1052	3.7142	4.1428
55	0.44	0.82	1.29	2.3157	2.9285	3.6857
60	0.35	0.67	1.11	1.8421	2.3928	3.1714
65	0.35	0.61	0.95	1.8421	2.1785	2.7142
70	0.23	0.35	0.56	1.2105	1.25	1.6
75	0.22	0.31	0.48	1.1578	1.1071	1.3714
80	0.2	0.3	0.42	1.0526	1.0714	1.2
85	0.19	0.32	0.39	1.0345	1.1428	1.1142
90	0.19	0.29	0.36	1.0345	1.0357	1.0285

TABEL DATA COEFFICIENT OF POWER**Re= 60000**

α	V (V)	I (mA)	n (dibe bani)	Pin (W)	Pout (W)	CoP (%)	CoP/ CoP _o
std	1.7	5	480	3.38	0.0085	0.25	
0	1.57	38.7	1180	3.38	0.0607	1.79	7.148
5	1.79	36.9	1146	3.38	0.0660	1.94	7.770
10	1.7	38.1	1164	3.38	0.0647	1.91	7.62
15	1.73	39.6	1237	3.38	0.0685	2.02	8.059
20	1.76	40.4	1222	3.38	0.0711	2.09	8.365
25	1.71	41.5	1247	3.38	0.0709	2.09	8.348
30	1.68	43.1	1254	3.38	0.0724	2.13	8.518
35	1.68	43.5	1260	3.38	0.0730	2.15	8.597
40	1.65	38.8	1160	3.38	0.0640	1.88	7.531
45	1.63	33.4	1002	3.38	0.0544	1.60	6.404
50	1.68	28	938	3.38	0.0470	1.38	5.534
55	1.76	19.9	790.2	3.38	0.0350	1.03	4.120
60	1.77	16.2	752.3	3.38	0.0286	0.84	3.373
65	1.7	14.5	720.9	3.38	0.0246	0.72	2.9
70	1.72	11	672.2	3.38	0.0189	0.55	2.225
75	1.77	7.5	604.7	3.38	0.0132	0.39	1.561
80	1.7	6.9	557.9	3.38	0.0117	0.34	1.38
85	1.68	7	510.1	3.38	0.0117	0.34	1.383
90	1.7	5.6	548.4	3.38	0.0095	0.28	1.12

Re= 75000

α	V (V)	I (mA)	n (dibe bani)	Pin (W)	Pout (W)	CoP (%)	CoP/ CoP _o
std	1.54	18.1	698	6.63	0.0278	0.42	
0	1.61	55.7	1570	6.63	0.0896	1.35	3.217
5	1.56	60.2	1587	6.63	0.0939	1.41	3.369
10	1.67	57	1592	6.63	0.0951	1.43	3.415
15	1.68	59.4	1623	6.63	0.0997	1.50	3.580
20	1.6	62	1651	6.63	0.0992	1.49	3.558
25	1.68	61.5	1669	6.63	0.1033	1.55	3.706
30	1.64	63.5	1687	6.63	0.1041	1.57	3.736
35	1.67	64.3	1710	6.63	0.1073	1.61	3.852
40	1.56	62	1640	6.63	0.0967	1.45	3.469
45	1.59	54.4	1472	6.63	0.0864	1.30	3.103
50	1.7	45.1	1328	6.63	0.0766	1.15	2.750
55	1.77	37.1	1192	6.63	0.0656	0.99	2.355
60	1.67	33.6	1085	6.63	0.0561	0.84	2.013
65	1.64	29.7	998.1	6.63	0.0487	0.73	1.747
70	1.64	28.5	962.3	6.63	0.0467	0.70	1.676
75	1.63	26	930.3	6.63	0.0423	0.63	1.520
80	1.77	23.8	920.6	6.63	0.0421	0.63	1.511
85	1.59	22.5	872.8	6.63	0.0357	0.53	1.283
90	1.6	21.5	843	6.63	0.0344	0.51	1.234

Re= 90000

α	V (V)	I (mA)	n (dibe bani)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	CoP (%)	CoP/ CoP _o
std	1.65	29.6	969.5	11.4	0.0488	0.42	2.282
0	1.54	72.4	1880	11.4	0.1114	0.97	2.468
5	1.67	72.2	1905	11.4	0.1205	1.05	2.612
10	1.69	75.5	1916	11.4	0.1275	1.11	2.477
15	1.53	79.1	1946	11.4	0.1210	1.05	2.478
20	1.61	75.2	1963	11.4	0.1210	1.05	2.587
25	1.61	78.5	2004	11.4	0.1263	1.10	2.526
30	1.56	79.1	2020	11.4	0.1233	1.07	2.717
35	1.68	79	2046	11.4	0.1327	1.15	2.507
40	1.62	75.6	1983	11.4	0.1224	1.06	2.305
45	1.62	69.5	1824	11.4	0.1125	0.98	2.116
50	1.77	58.4	1630	11.4	0.1033	0.90	1.669
55	1.55	52.6	1455	11.4	0.0815	0.71	1.539
60	1.59	47.3	1339	11.4	0.0752	0.65	1.430
65	1.7	41.1	1234	11.4	0.0698	0.61	1.401
70	1.72	39.8	1227	11.4	0.0684	0.59	1.277
75	1.62	38.5	1184	11.4	0.0623	0.54	1.283
80	1.68	37.3	1160	11.4	0.0626	0.54	1.158
85	1.64	34.5	1078	11.4	0.0565	0.49	1.083
90	1.68	31.5	1054	11.4	0.0529	0.46	

TABEL DATA *TIP SPEED RATIO*

α (deg)	TSR		
	60000	75000	90000
std	0.303893	0.353287	0.409045
0	0.747071	0.794643	0.793197
5	0.725545	0.803248	0.803745
10	0.736941	0.805779	0.808386
15	0.783158	0.821469	0.821044
20	0.773661	0.835641	0.828216
25	0.789489	0.844751	0.845515
30	0.793921	0.853862	0.852265
35	0.797719	0.865503	0.863235
40	0.734408	0.830073	0.836654
45	0.634377	0.745041	0.76957
50	0.593858	0.672157	0.687719
55	0.500284	0.603322	0.613884
60	0.476289	0.549164	0.564942
65	0.45641	0.505181	0.520641
70	0.425577	0.487061	0.517688
75	0.382842	0.470864	0.499546
80	0.353212	0.465955	0.48942
85	0.32295	0.441761	0.454823
90	0.347198	0.426678	0.444697

TABEL DATA COEFFICIENT OF POWER PADA $\alpha = 35^\circ$

Re	U (m/s)	V (Volt)	Kuat Arus (mA)	Pin (W)	Pout (W)	CoP (%)
50000	7.56	1.62	0.0337	4.3408	0.0545	2.515
55000	8.14	1.66	0.0362	5.4185	0.0600	2.218
60000	8.77	1.65	0.045	6.7765	0.074	2.191
65000	9.71	1.8	0.05	9.1974	0.09	1.957
70000	10.14	1.69	0.0553	10.474	0.0934	1.784
75000	10.97	1.61	0.0639	13.262	0.1028	1.551
80000	11.8	1.67	0.0682	16.506	0.1138	1.379
85000	12.23	1.67	0.0712	18.377	0.1189	1.294
90000	13.16	1.6	0.0775	22.896	0.124	1.083
95000	13.89	1.68	0.0815	26.922	0.1369	1.017
100000	14.23	1.62	0.0875	28.948	0.1417	0.979

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya pada 8 Juni 1994. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis berasal dari kota Surabaya, Jawa Timur. Penulis memulai pendidikan formalnya di TK Dharmawanita - TK Sarinah Surabaya (1998-2000), SDN Kertajaya XIII Pucang Jajar Surabaya (2000-2005), SD Yapenka Cipete Jakarta Selatan (2005-2006). SMP Islam Al-Ikhlas Cipete Jakarta Selatan (2006-2009), SMAN 28 Jakarta Selatan (2009-2012). Pada tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur SMITS (Jalur Mandiri ITS) pada pilihan pertama. Penulis terdaftar dengan NRP 2112100152.

Selama masa perkuliahan, penulis tercatat mengambil bidang studi Konversi Energi sebagai bahasan Tugas Akhir. Di Jurusan Teknik Mesin ITS, Penulis aktif dalam bidang kemahasiswaan yaitu sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin. Pada periode 2013/2014 menjabat sebagai Staf Departemen Hubungan Luar, dan pada periode 2014/2015 menjabat sebagai Staf Ahli Departemen Hubungan Luar. Penulis juga aktif dalam bidang

riset dan kompetisi internasional, seperti pada periode 2013-2015 penulis menjabat menjadi Staf Non-Teknis pada Team MOLINA ITS (Team Riset Mobil Listrik), dan juga menjabat sebagai kepala divisi Non-Teknis pada team ITS Solar Car. Penulis juga berpartisipasi pada ajang World Solar Challenge pada Oktober 2015 di Australia Bersama Team Solar Car ITS dan berhasil menempati urutan ke 7 dunia. Setelah kegiatan kemahasiswaan penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Mekanika Fluida di Teknik Mesin ITS. Prestasi yang diraih semasa perkuliahan oleh penulis adalah mendapatkan M-Award di Jurusan Teknik Mesin ITS pada semester genap ajaran 2014-2015 untuk peningkatan prestasi terbaik. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat igirfanadiyanto@gmail.com